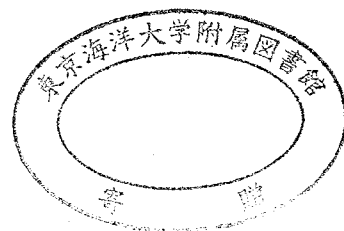


# 画像処理による気液二相流運動ベクトル抽出と3次元運動検出

著者	于 笑然
学位授与機関	東京商船大学
学位授与年度	2004
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00000675/">http://id.nii.ac.jp/1342/00000675/</a>



# 修士学位論文

## 画像処理による気液二相流運動ベクトル 抽出と 3 次元運動検出に関する研究

平成 16 年度

(2004)

東京商船大学大学院  
商 船 学 研 究 科  
交通電子機械工学専攻  
于 笑然

# 目次

第1章 序論 .....	6
1.1 研究の背景 .....	6
1.2 研究の目的 .....	6
1.3 本論文の構成 .....	7
第2章 気液二相流、実験設備 .....	8
2.1 はじめに .....	8
2.2 ステレオ撮影法の研究現状 .....	9
2.2.1 ステレオ法の研究現状 .....	9
2.2.2 本研究の手法 .....	10
2.2.3 実験設備と条件 .....	11
第3章 二相流の三次元運動ベクトルと気泡の三次元運動モデル .....	16
3.1 はじめに .....	16
3.2 処理の流れ .....	16
3.3 気泡画像の撮像 .....	17
3.4 二値化 .....	18
3.4.1 P-タイル法 .....	18
3.4.2 モード法 .....	19
3.4.3 微分ヒストグラム法 .....	19
3.4.4 判別分析法 .....	19
3.4.5 可変閾値法 .....	20
3.5 画像処理範囲の切出し .....	22
3.6 背景差分 .....	22
3.7 雑音除去 .....	24
3.8 気泡領域内部の穴埋め処理 .....	25
3.9 動態マッチングによる気泡の同定 .....	26
3.10 ラベリング .....	31
3.11 結果解析 .....	36
3.12 運動気泡三次元モデル .....	39
第4章 オプティカルフローの推定 .....	43
4.1 はじめに .....	43
4.2 オプティカルフロー .....	44
4.2.1 オプティカルフローの拘束方程式 .....	44

4.2.2 Lucas と Kanade の拘束条件.....	46
4.3 オプティカルフローの検出 .....	47
4.4 オプティカルフローの分布結果.....	51
4.5 オプティカルフローの分析 .....	58
第 5 章 解析結果と検討 .....	60
5.1 結果.....	60
5.2 検討.....	60
第 6 章 終わりに .....	61
6.1 結論.....	61
6.2 今後の課題.....	61
謝辞.....	63
参考文献.....	64



# 図目次

図 2.1 気泡の楕円体モデル .....	8
図 2.2 ベント管内の気泡挙動 .....	9
図 2.3 ステレオ撮影設備の構造 .....	12
図 2.4 ステレオ撮影設備の投影 .....	13
図 2.5 ステレオ法で撮影した画像 .....	13
図 2.6 実験設備[2] .....	14
図 2.7 気泡発生装置 .....	15
図 3.1 処理の流れ .....	16
図 3.2 3ms 毎の気泡の写真 .....	18
図 3.3 モード法による閾値選択 .....	19
図 3.4 ヒストグラム法より閾値を決める .....	21
図 3.5 モード法の結果 .....	21
図 3.6 可変閾値法の結果 .....	22
図 3.7 画像処理範囲の切出し .....	23
図 3.8 背景差分 .....	24
図 3.9 雑音除去 .....	25
図 3.10 穴埋め処理 .....	26
図 3.11 テンプレートマッチング .....	27
図 3.12 マッチングの結果 .....	30
図 3.13 複数気泡の条件下での気泡の動態マッチング .....	31
図 3.14 ラベリング処理 .....	32
図 3.15 ラベリング処理 .....	33
図 3.16 楕円体と仮定する気泡の径情報 .....	36
図 3.17 ボイド率 .....	37
図 3.18 気泡上昇角度 .....	38
図 3.19 気泡の上昇運動速度（運動ベクトル Z 軸での投影） .....	38
図 3.20 気泡の運動速度（運動ベクトルの大きさ） .....	39
図 3.21 三次元モデルと X-Z, Y-Z 面の投影 .....	40
図 3.22 三次元モデルと運動遺跡の X-Y 面の投影 .....	41
図 4.1 移動ベクトルと速度ベクトルの違い .....	44

図 4.2 速度空間 .....	45
図 4.3 オプティカルフロー方法によるボール表面の運動ベクトル抽出 .....	47
図 4.4 オプティカルフローの計算 .....	48
図 4.5 気泡のオプティカルフロー抽出 .....	51
図 4.6 一枚目 X-Z 面投影フローベクトル大きさ .....	52
図 4.7 一枚目 Y-Z 面投影フローベクトル大きさ .....	52
図 4.8 一枚目 X-Z 面投影フローベクトル向き .....	53
図 4.9 一枚目 Y-Z 面投影フローベクトル向き .....	53
図 4.10 二枚目 X-Z 面投影フローベクトル大きさ .....	54
図 4.11 二枚目 Y-Z 面投影フローベクトル大きさ .....	54
図 4.12 二枚目 X-Z 面投影フローベクトル向き .....	55
図 4.13 二枚目 Y-Z 面投影フローベクトル向き .....	55
図 4.14 三枚目 X-Z 面投影フローベクトル大きさ .....	56
図 4.15 三枚目 Y-Z 面投影フローベクトル大きさ .....	56
図 4.16 三枚目 X-Z 面投影フローベクトル向き .....	57
図 4.17 三枚目 Y-Z 面投影フローベクトル向き .....	57
図 4.18 気泡重心の運動軌跡 .....	59
 図 6.1 複数気泡図 .....	 61
図 6.2 ドラゴン流れ .....	62
図 6.3 細管の濡れ性 .....	62

# 表目次

表 1	気液流量条件 .....	12
表 2	ラベリングの結果.....	35
表 3	気泡重心の三次元座標 .....	35
表 4	三次元運動ベクトル分析表 .....	36
表 5	フローの大きさの平均値とフローの向きの平均値.....	58

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

気液二相流に関する研究は、高転換軽水炉の炉心、核融合炉のダイバータ、自然循環形の原子炉などの安全解析、高性能電子デバイスなどの冷却、キャビテーション気泡の運動に関連して重要になっている。

気泡が管内液流体中に分散する気泡流現象をより詳しく知る必要性から、気泡流解析モデルは、気液を混合物として取扱う混合流モデルから、気液両相をそれぞれ別個の流体として扱う二流体モデルが主流になりつつある。二流体モデルにおける気液相間の質量、運動量及びエネルギー輸送項を得るためには、気液相速度及び乱流密度などと並んで、気泡径、ボイド、気液界面面積濃度などの気泡形状の管断面及び管軸方向の空間的、時間的分布の実験的情報が必要となる。しかしながら、気泡の挙動と界面は複雑であり、散在する気泡の分布と形状を正確に測定することは難しい。

今までビデオや写真撮影によって気泡形状を観測する実験も多く行われている。この方法は、空間情報を得られるために気泡径、界面形状を直接測定できることや非接触であるため流れを乱さないなどの利点があり、画像可能なエネルギー線（X線、中性子線）を用いれば非可視壁状態における測定も可能である。気泡の運動については、多くの研究者により解析されている。従来の研究では垂直細管を水平面上の直交する2つのステレオカメラで撮像し、気泡画像を処理する方法で気泡の重心を求めて、気泡重心より気泡の速度と加速度の解析を行っていた。しかしながら、気泡の同定は、全部手作業で行われている。手作業が原因で重心点座標誤差が生じる、また気泡の解析に対して十分な統計データを得るためには、1つの条件あたり数百枚ほどの画像解析が必要となる。これは最も大変な作業である。

気液二相流中の気泡運動は気泡相互干渉や乱れと気泡の干渉などの影響を受けると考えられるが、これらに関する知見は十分ではない。二相流の中に流れている気泡は、その周りの液層の流動や乱流による影響を受るながら、液流に影響もおよぼすことがわかる。この影響の表現としては、気泡の全体的な運動趨勢と、気泡の表面の微小な変化の二つ注目点がある。これらを統計的に調べるために、気泡三次元の運動軌跡と、気泡表面変化の三次元画像解析法が望まれている。

## 1.2 研究の目的

本研究では第一に、気泡の重心の三次元運動ベクトルを気泡の運動ベクトルと認め、以前の研究で使用われた画像処理手法を発展させることによって、またより高効率、精確な処理を行え

るように動的なマッチング手法を加えてプログラムを作成した。第二に気泡の重心の三次元運動ベクトルと気泡表面のオプティカルフローベクトルに基づく気泡解析方法を構築し、鉛直円管内気泡乱流に適用し、乱流中気泡運動を測定した。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、気液二相流を解析する実験設備の代表的な手法について簡単に紹介する。

第3章では、二相流の重心運動ベクトル、追跡処理の計算方法と適用方法について述べる。

第4章では、オプティカルフローの計算方法と適用方法について述べる。

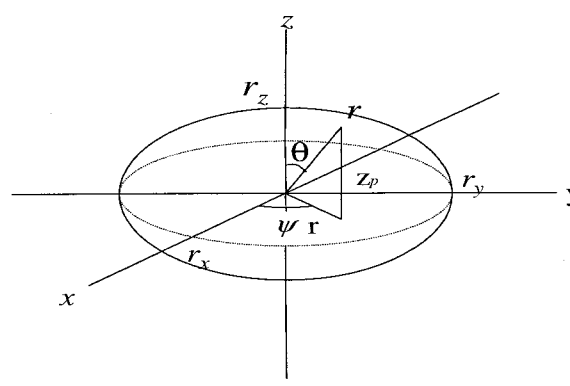
第5章では、本研究で提案された方法を用いる気液二相流の解析結果と検討。

第6章では、本研究の結果をまとめるとともに、今後の課題について述べる。

## 第2章 気液二相流、実験設備

### 2.1 はじめに

気泡流の研究において気-液二相運動輸送方程式を構築するため、管内液体中に分散する気泡の大きさ、位置などの挙動を測定するさまざまな研究が行われている [2] ~ [4]. 従来電極式のボイドプローブが多く用いられているが、この方式には、気相流量が小さく、従って気泡径とボイド率が小さくなる低ボイド領域の気泡流においては、管内のプローブ挿入による液相の乱れのため、測定誤差が大きくなってしまう欠点がある [6]. また気泡径や気泡の界面挙動を直接知ることはできない. ダブルボイドプローブ法によって得られた弦長を基に球体を仮定して気泡直径を求める実験が行われているが、一般的な気泡流においては上述のように気泡は複雑な形状になり、気泡を球体として仮定できる条件は少ないと考えられる. 一方、ビデオや写真撮影によって気泡形状を観測する実験も多く行われている [7]. 気泡の画像処理法には、散在気泡の界面を明確にすることが難しいこと、1方向からの撮影では管断面内の3次元的分布を知ることができない欠点があったが、賞雅らは垂直細管を水平面上の直交する2つのカメラで撮像し、ビデオ気泡画像を処理する方法を開発し、垂直円管内の3次元気泡挙動を測定した [4]. この方法は、空間情報を得られるため気泡径、界面形状を直接測定できることや非接触であるため流れを乱さないなどの利点があり、可視化可能なエネルギー線 (X線, 中性子線) を用いれば非可視壁状態における測定も可能である. この画像処理においては、気泡を楕円体と仮定して、気泡半径、体積及び界面面積が求められている.



$$\frac{r_p^2 \cos^2 \phi}{r_x^2} + \frac{r_p^2 \sin^2 \phi}{r_y^2} + \frac{z_p^2}{r_z^2} = 1 \quad (2.1.1)$$

図 2.1 気泡の楕円体モデル

## 2.2 ステレオ撮影法の研究現状

### 2.2.1 ステレオ法の研究現状

#### [1] 180° ベント管内気泡流

大気圧常温の空気－水系180°ベント管内気泡流の気泡径, ボイド率及び界面面積濃度などの管断面分布をステレオ撮影された気泡画像処理することによって測定が行われている[5]. ボイド率及び界面面積濃度は, 気泡を楕円体と仮定して求めた. 画像解析の結果から, ベント管コーナ頂部の気泡は, 管中心とベント内周のほぼ中心に分布し, ベント入り口付近ではほぼ球体である気泡が扁平な形状になること, などが明らかになった. ベント各部の管断面平均気泡径は変化がなく, ベント各部の管断面の界面面積濃度分布は, ボイド率分布の変化とほぼ同様の变化をした. またレーザトッパー流速計により主流方向の单相液流速分布及び二次流が強くなっていることを確認した. 液单相流時の液気流速測定結果から, 気泡流時の気泡の管断面位置と形状の測定結果を推察すると, 気泡流時のベント管コーナ頂部の気泡位置は, ベントの遠心力と二次流れによる力との釣り合いによるものであり, またその気泡形状は二次流れによって影響されている.

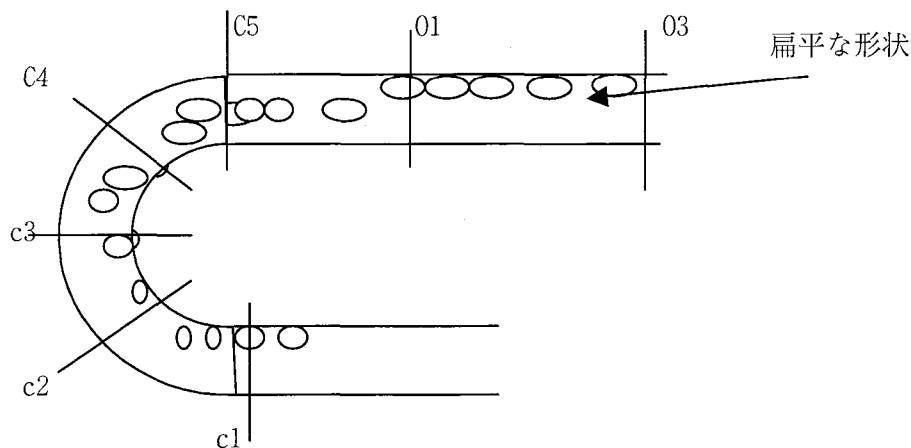


図 2.2 ベント管内の気泡挙動

#### [2] 微小重力／通常重力下の気泡流界面測定

上昇気泡流内の気泡にかかる重力項を評価するために, (株) 地下無重力実験センターの落下塔を用いて, 1-g と  $\mu g$  におけるガス－水系の気泡流実験が行われている[6]. 気泡の径や管内位置, 気泡のひずみなどは, ステレオ画像解析法 (Stereo Image-processing Method, SIM) によって測定された. 実験における特徴は以下のとおりである.

- (1) 落下塔実験装置により残留重力のない微小重力環境を得ている.

- (2) 1-g から  $\mu g$  へ, さらに  $\mu g$  から再び 1-g へという径時変化を測定している.
- (3) 1-g と  $\mu g$  でほとんど同じ気泡径の実験を行っている.
- (4) ボイドプローブで測定が難しい 1~3mm 径の小さな気泡の管断面測定をしている.

実験結果より以下のことが明らかになった.

- (1) ザウター平均径 1.6mm の小さな気泡においても, ボイド分布は 1-g では壁面にピークを持ったくさ形分布に,  $\mu g$  ではコアやくさ形のピークは残るが管断面にはほぼ一様な分布になる.  $\mu g$  は, 気泡径は 1-g のときよりも小さくなる.
- (2) 1-g では, 気泡はドリフト速度のために管軸方向に伸び, 壁面に沿って下端を壁面粘性低層につけた底層気泡がある.  $\mu g$  では底層気泡はなくなる.
- (3) 1-g においても  $\mu g$  においても, 径の増加とともに気泡は偏平な形になる.
- (4) Lin-Rezakullah の流体モデルを用いて気泡流のシミュレーションを行い, ほぼ実験結果と計算結果の傾向が合っていることを確認した.

今後の課題として, 今回の気液流量実験範囲が狭かったのでこれを広げること, 特に航空機実験では残留重力および横方向加速度のために計測しにくい低液流速域の気泡流を測定すること [9][10]. および初期気泡径の影響等を調べることがある. また計測された気泡の界面に関する情報の他に, 落下塔実験では測定時間の制約のために非常に難しいが, 液相速度および乱れの同時計測ができれば,  $\mu g$  の気泡流実験をより充実したものにすることができるとしている.

### [3] 気泡の衝突現象の研究

一般的に気泡が先行気泡の後流域に入ったとき, 気泡は加速し先行気泡と衝突する. Otake らによると, 先行気泡が後続気泡に顕著な影響を及ぼし始める臨界距離  $L_{WE}$  がある Wake entrainment model による, 界面面積濃度変化率は次のように表される.

$$\langle \Phi_{WE} \rangle = \left( \frac{\langle \alpha \rangle}{\langle a_i \rangle} \right)^2 \frac{\Gamma_{WE} \langle \alpha \rangle^2}{\langle D_b \rangle^4} (\langle v_g \rangle - \langle v_f \rangle) \exp \left( -K_c \sqrt{\frac{\langle D_b \rangle^5 \rho_f^3 \langle \epsilon \rangle^2}{\sigma^3}} \right) \quad (2.1.2)$$

## 2.2.2 本研究の手法

本研究では気泡の運動を分析するために, 賞雅らのステレオ撮影法により垂直細管内の気泡画像を撮影した. 撮影したビデオ動画画像から静止画像を取り出してから, 気泡の濃淡画像に対し



二値化、細管部分を切り出し、背景差分、閾値雑音除去、腐食と膨張処理、気泡充填、ラベリング、ブロックマッチング等の前処理を施す。含まれる画素で Image A と Image B で同定された対象気泡投影のそれぞれの重心点を求める。ここではこの気泡の重心運動を気泡の運動とみなす。直交する二方向画像から三次元的に最構成した単一気泡の重心の運動軌跡より、気泡の 3 次元運動ベクトル測定を行う。

### 2.2.3 実験設備と条件

本研究で用いる画像データは東京海洋大学賞雅研究室で得られたものである。以下に示す実験設備と条件および種々の工夫は同研究室のものである。

装置の概略を図 2.3 に示す[2]。内径 20mm の垂直細管内気泡流における気泡は、互いに直交する 2 つの方向から撮像される、図 2.4 に表されるように 2 つの画像 Image A と Image B を、平面座標系  $x-z$  と  $y-z$  に対応させる。 $x-y$  座標系の原点は画像 image A の左下の点で、 $y-z$  系の原点は画像 imageB の右下の点である。実際は空間的に同一点である、 $z$  は気泡の上昇方向である(図 2.4)。

同一時刻に気泡を表面  $x-z$  系と  $y-z$  系に投影の重心点を計算して、気泡重心の空間座標が求められる。

時刻  $t_1$  に Image A の平面  $x-y$  に投影された気泡重心  $w_1' (x_1, z_1)$  と ImageB の平面  $y-z$  に投影された気泡重心  $w_1'' (y_1, z_1)$  を求めて。これらより得られる重心点空間座標を  $w_1 (x_1, y_1, z_1)$  とする。同様に時刻  $t_2$  の気泡の重心点空間座標を  $w_2 (x_2, y_2, z_2)$  とする。連続画像中の気泡の空間的重心位置を求め、細管内気泡の空間運動追跡を行う。

### 2.2 実験装置と条件

実験装置本体を図 2.3 に示す、テストチャネルは、内径 20mm の F E P 管とアクリル製の水箱からなる。F E P 管と水の屈折率はそれぞれ 1.34 及び 1.33 であるので、管内壁面からの反射信号が除去されて液膜界面からの信号のみを入手できる。また水箱を用いることにより、管断面方向の曲率の違いから生じる光の焦点ひずみによる検出不可の問題も回避できる。

無ひずみの表面反射鏡、ストロボおよび CCD ビデオカメラの図 2.3 のような配置により、2 方向からの画像が透過光で撮影される。また測定部全体はほかの光が入らないように黒布で覆われている。撮影画像範囲は 80 x 80 mm、管中心よりカメラレンズまでの直線距離は 880 mm、撮影距離は 1150 mm である。ビデオカメラのシャッタ速度は 1/1000 s 開放としてある。ストロボの発光時間と発光間隔はそれぞれ、 $1.2 \mu\text{s}$  と  $0.5 \mu\text{s}$  とした。バックグラウンドの明るさのむらをなくするためにストロボの前面に白紙をはってある。また画像のノイズを低下させるために CCD ビデオカメラからの信号はカラー信号を除去し、輝度信号のみをビデオテープに記録する。気泡吹込み部の気泡発生は、透過粒子径 1.5 $\mu\text{m}$  の黄銅焼結管 4 本による気泡発生と八つの直径 1 mm の気泡発

生孔を管周囲に設けたアクリル管 1 本による気泡発生 の二つ方法を用いた. 表 1 に気液流量条件を示す.

JL(m/s)	0.4	0.8	1.2	1.6
Jc(m/s)	0.017	0.034		0.068

表 1 気液流量条件

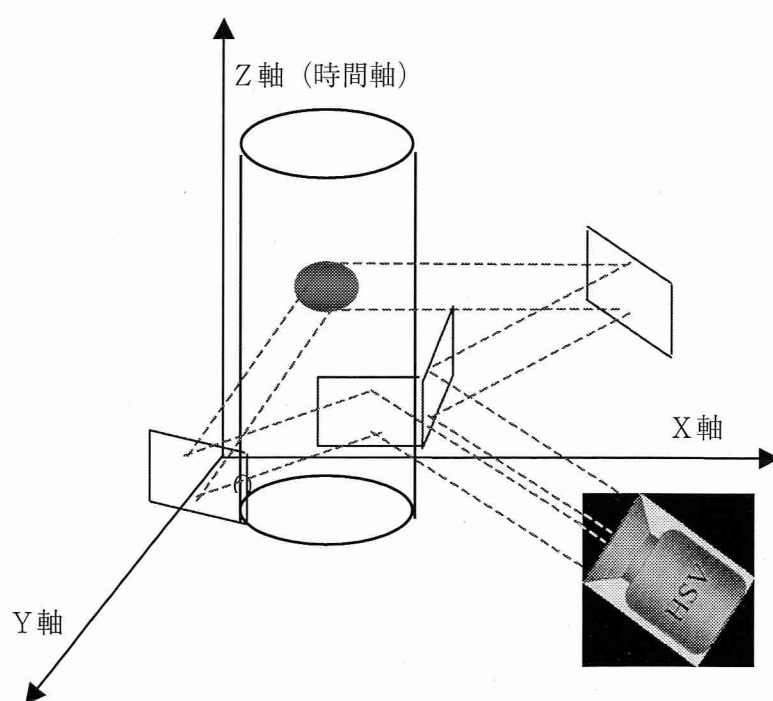


図 2.3 ステレオ撮影設備の構造

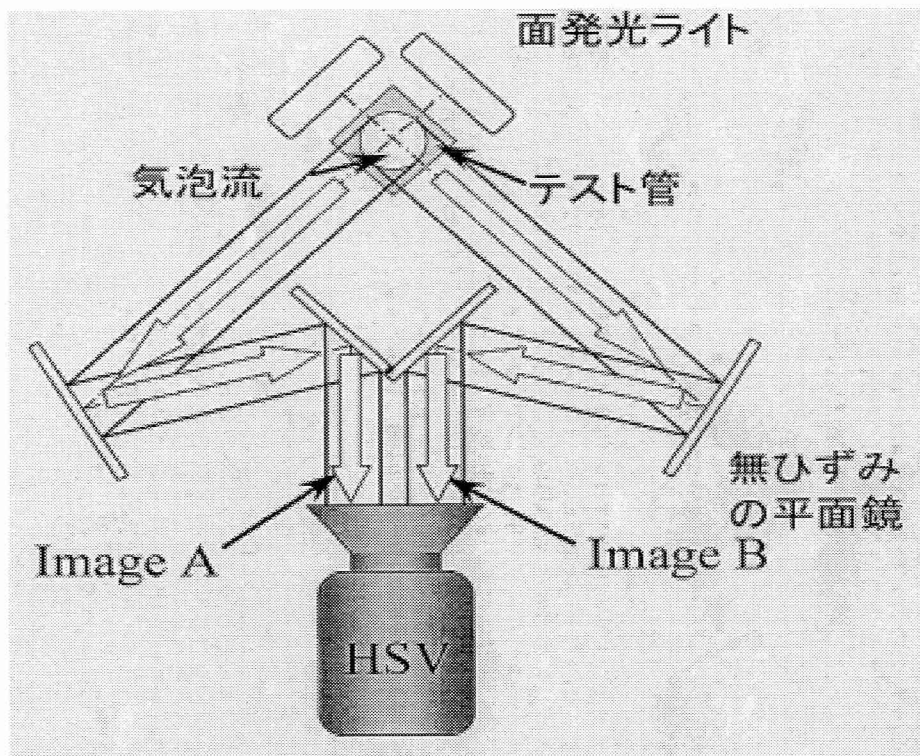


図 2.4 ステレオ撮影設備の投影

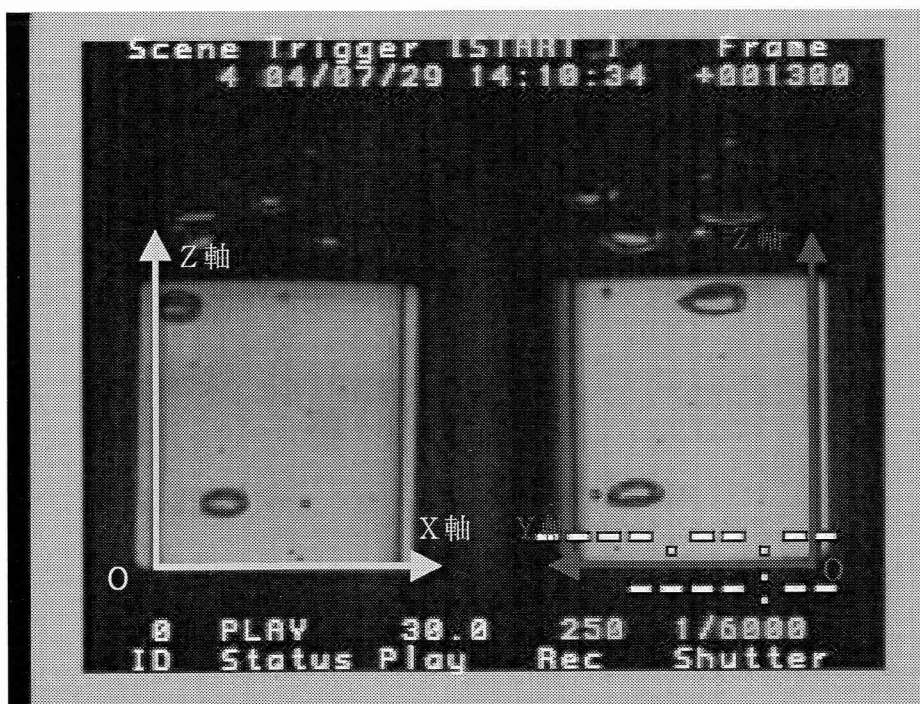


図 2.5 ステレオ法で撮影した画像

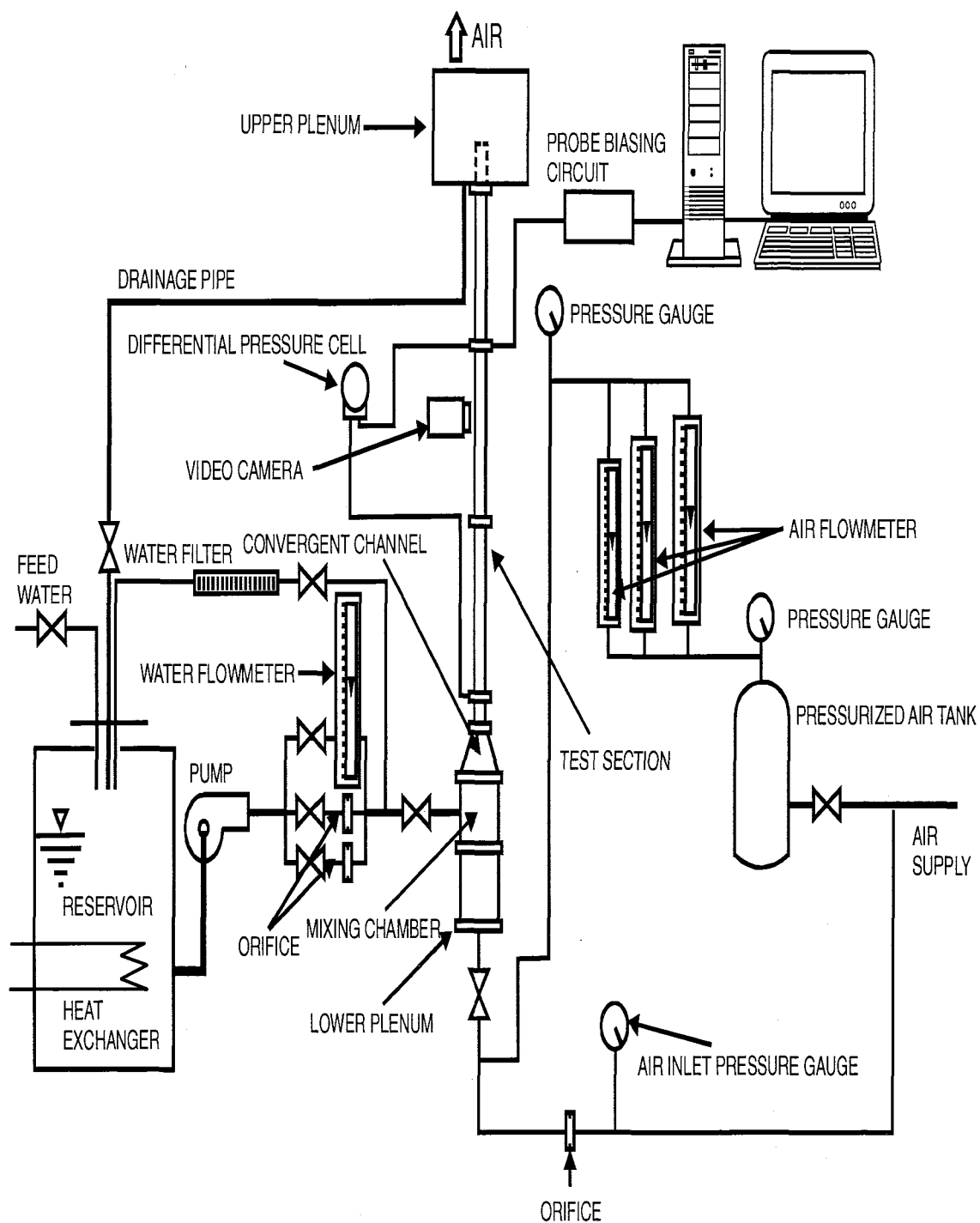


図 2.6 実験設備[2]

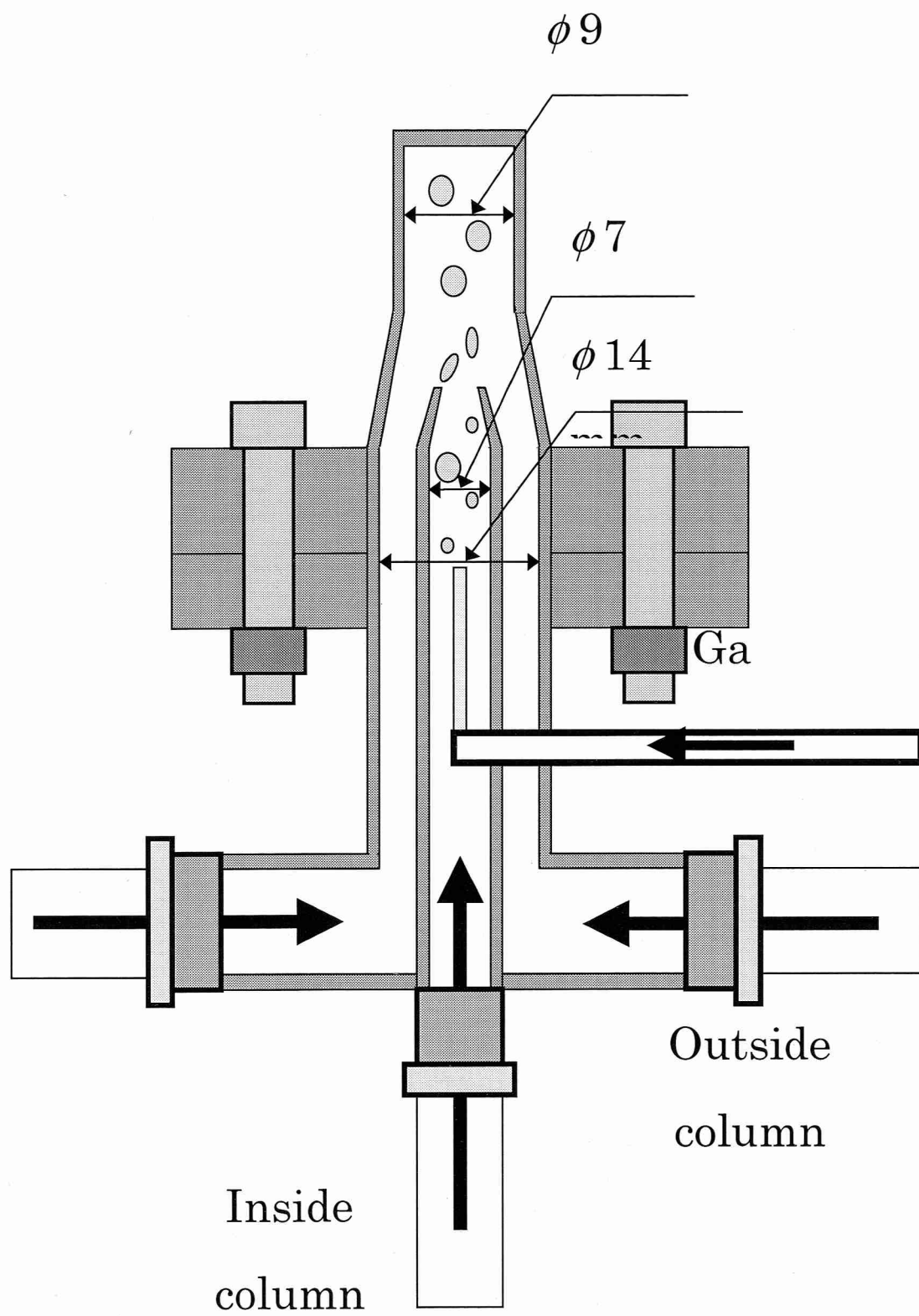


図 2.7 気泡発生装置

# 第3章 二相流の三次元運動ベクトルと気泡の 三次元運動モデル

## 3.1 はじめに

気液二相流中の気泡運動は気泡相互干渉や乱れと気泡の干渉などの影響を受けると考えられるが、これらに関する知見は十分ではない。二相流の中に流れている気泡は、その周りの液層の流動による影響を受けながら、液流に影響もおよぼすことが知られている。本研究では気液乱流中の気泡運動に及ぼす液相乱れ、気泡間相互作用の影響を調べる為に、気泡運動の三次元画像計測法を利用した。

## 3.2 処理の流れ

本研究の処理の流れを図 3.1 に示す。

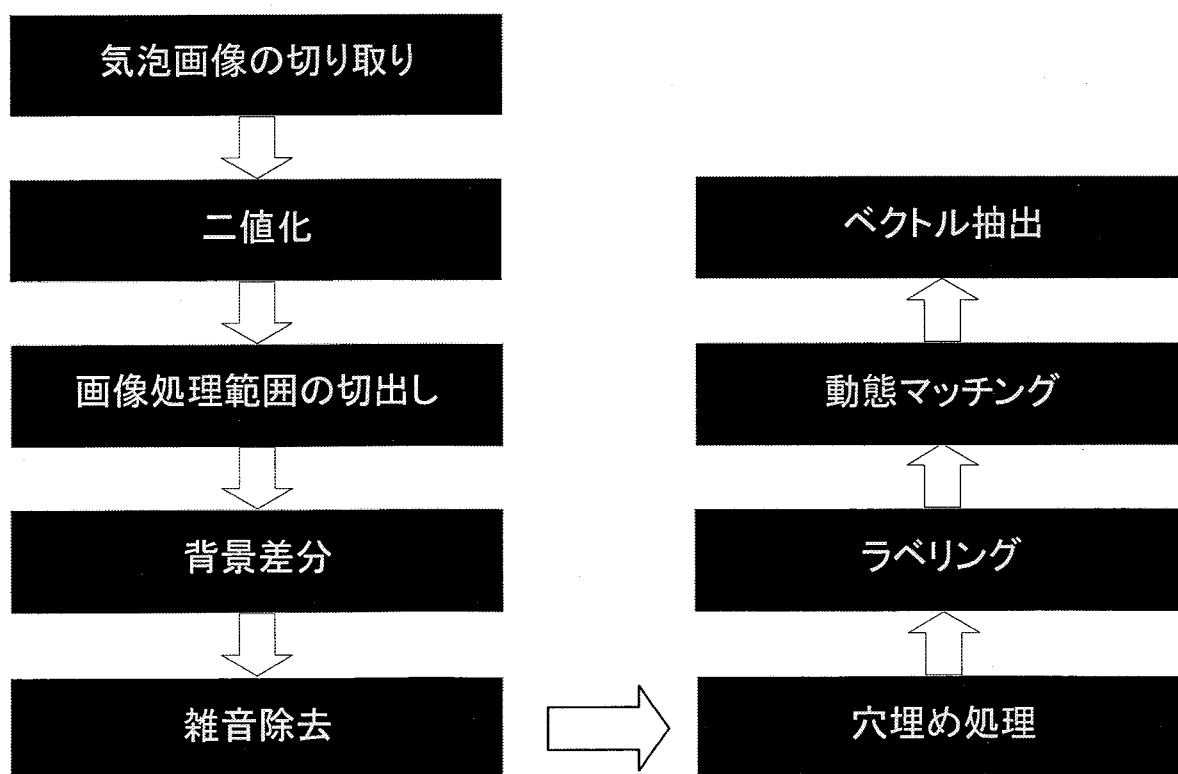


図 3.1 処理の流れ

### 3.3 気泡画像の撮像

今実験では、高速ビデオカメラでシャッタ速度を  $1/1000$  s に設定して、ストロボの発光時間と発光間隔はそれぞれ、 $1.2\mu\text{s}$  と  $0.5\mu\text{s}$  とした。取った動画は  $1\text{ m S}$  毎に静止画像を切り取って、その連続する静止画像から気泡の運動や変化が見える。





図 3.2 3ms 毎の気泡の写真

## 3.4 二値化

抽出したい対象物や特徴が、背景や他の特徴と明らかに異なる濃度をもつとき、画像から目的物を抽出する最も簡単な方法は閾値処理である。閾値処理は階調変換の一つであるが、閾値処理は見やすくするための変換ではなく対象の抽出が目的なので、変換曲線はステップ状になる。閾値処理のうちで、対象と背景の二つの領域に分離する手法を2値化処理と呼ぶ。2値化処理では通常、対象に1を背景には0を与え、1の画素の集合は図形と呼ばれる。

対象物と背景の濃度があらかじめわかっている場合には固定の閾値を設定できるが、撮像条件の変化や前処理によって除去しきれなかったシェーディングの影響等を考えると、画像自身から自動的に閾値をきめるほうが望ましく、いくつかの手法がある。

### 3.4.1 P-タイル法

対象が画像に占める割合、つまり面積比がおおよそわかっている場合には、画像の濃度ヒストグラムが利用できる。割合をPとすると、対象が背景に比べて大きい値をもっている場合には、大きい濃度値のほうから分布を加算していった、ちょうどPになる濃度を閾値とすればよい。この手法をP-タイル法（P-tile method）と呼ぶ、文書画像や線密度が予期できる論理回路図面等へ適用できる。



### 3.4.2 モード法

P-タイル法では対象の占有率Pが既知である必要があるが、多くの場合不明である。ところで、閾値処理では対象物と背景の濃度差が大きい画像を扱っているので、濃度ヒストグラムは図3.3.1.1に示すように、対象物と背景のそれぞれの平均的な

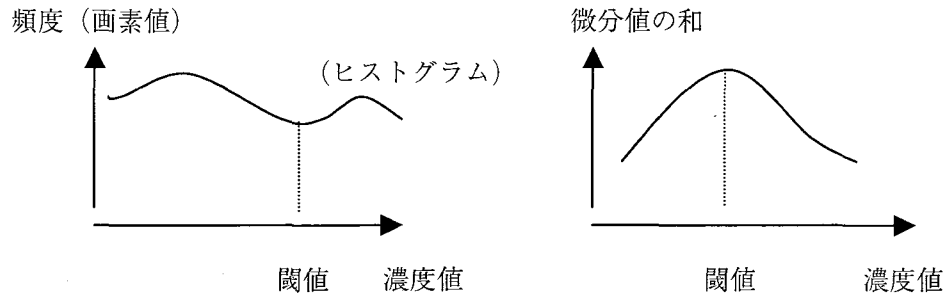


図 3.3 モード法による閾値選択

明るさでピークをもつ。そこで、この二つのピークの間の谷の底にあたる濃度を閾値とすれば対象物を抽出することができる。この手法をモード法 (mode method) と呼ぶ。モードとは峰状の曲線を指し、二つ峰をもつとき双峰的 (bimodal)、富士山のような形を単峰 (unimodal) と呼ぶ。

### 3.4.3 微分ヒストグラム法

画像中の対象物と背景の境界は、濃度値が急に变化する部分 (エッジ) に位置すると考えられる。画像の濃度値を直接利用するのではなく、微分値 (濃度の変化率) を利用して閾値を決める方法が提案されている。これは次の手順で行われる。画像のなかのある画素が濃度値  $S$  をもつとする。この画素において微分値 (たとえば、近傍の各画素とその画素の濃度値との差の最大値、あるいは各々の差の絶対値の総和等) を求める。与えられた画像中で濃度値  $S$  をもつすべての画素における微分値の和を求める。これをすべての  $S$  に対して求めて微分ヒストグラムを得る (図 3.3.1.2)。この結果のヒストグラムの最も高い値をとる濃度値を選択すれば、濃度の変化率が高い部分に対応すると考えられる。この方法は、図形の境界が一定の濃度値の範囲に納まっているときに有効である。ただし、実際には境界付近の濃度値が複雑に変化する対象も多く、この方法がうまく働かないこともある。

### 3.4.4 判別分析法

画像の濃度値のヒストグラムにおいて、濃度値の集合を閾値  $t$  で2つのクラス ( $t$  以上と  $t$  未満) に分割したと仮定したとき、2つのクラス間の分離が最もよくなるようにパラメータ  $t$  を決めるという考え方に基づいた閾値選択法が提案されている。実際には、2つのクラスの平均値の分散 (クラス間分散) と各クラスの分散 (クラス内分散) の比を最大にするという基準により  $t$  を

決める.  $t$  の決め方を以下に示す.

与えられた画像が  $1, 2, \dots, L$  の全部で  $L$  レベルの濃度値をもつとする. ここで: 閾値を  $k$  とし,  $k$  以上の濃度値をもつ画素と, それより小さな値をもつ画素の 2 つのグループに分け, クラス 1, クラス 2 とする. クラス 1 の画素を  $\omega_1(k)$ , 平均濃度値を  $M_1(k)$ , 分散を  $\sigma_{1(k)}$  とおき, クラス 2 の画素数を  $\omega_2(k)$ , 平均濃度値を  $M_2(k)$ , 分散を  $\sigma_2(k)$  とおくと, クラス内分散は

$$\sigma_w^2 = \omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2 \quad (3.3.1)$$

クラス間分散は

$$\sigma_B^2 = \omega_1 (M_1 - M_T)^2 + \omega_2 (M_2 - M_T)^2 = \omega_1 \omega_2 (M_1 - M_2)^2 \quad (3.3.2)$$

で与えられる. ここで  $\sigma_B^2 / \omega_w^2$  を最大にするには  $\sigma_B^2$  を最大にすればよい. すなわち,  $k$  を変化させて  $\sigma_B$  を最大にする  $k$  の値を求めればよい.

この方法は, ヒストグラムが 2 つ山をもつ (谷が存在する) ときモード法として働き, 山がないときにも閾値が求まるという便利さから, よく用いられている. 反面, 画像の幾何学的構造は反映されないで, 必ずしも判別基準が人間の視覚と一致しないこともある.

### 3.4.5 可変閾値法

画像中の場所により平均的な濃度が変化している場合, 単一の閾値で全画面をうまく 2 値化することはできない. この場合は, 閾値を部分領域 (小領域) ごとに变化させて全画面を処理する.

これは別名, 動的閾値処理とも呼ばれる. 入力装置のシェーディング等により画像が濃度値のゆるやかな勾配をもつときに適用される.

画像の二値化を  $5 \times 5$  近傍の平均濃度を閾値として同時に行う.

$$t_{ij} = \left( \begin{array}{ccccc} f_{i-2,j-2} & f_{i-2,j-1} & f_{i-2,j} & f_{i-2,j+1} & f_{i-2,j+2} \\ f_{i-1,j-2} & f_{i-1,j-1} & f_{i-1,j} & f_{i-1,j+1} & f_{i-1,j+2} \\ f_{i,j-2} & f_{i,j-1} & f_{i,j} & f_{i,j+1} & f_{i,j+2} \\ f_{i+1,j-2} & f_{i+1,j-1} & f_{i+1,j} & f_{i+1,j+1} & f_{i+1,j+2} \\ f_{i+2,j-2} & f_{i+2,j-1} & f_{i+2,j} & f_{i+2,j+1} & f_{i+2,j+2} \end{array} \right) / 25 \quad (3.3.3)$$

$$g_{i,j} = \begin{cases} 1; & f_{i,j} \geq t_{i,j} \\ 0; & \text{その他} \end{cases} \quad (3.3.4)$$

従来の手法では, モード法を使って気泡の画像を二値化した. 結果は図 3.4 に示す.

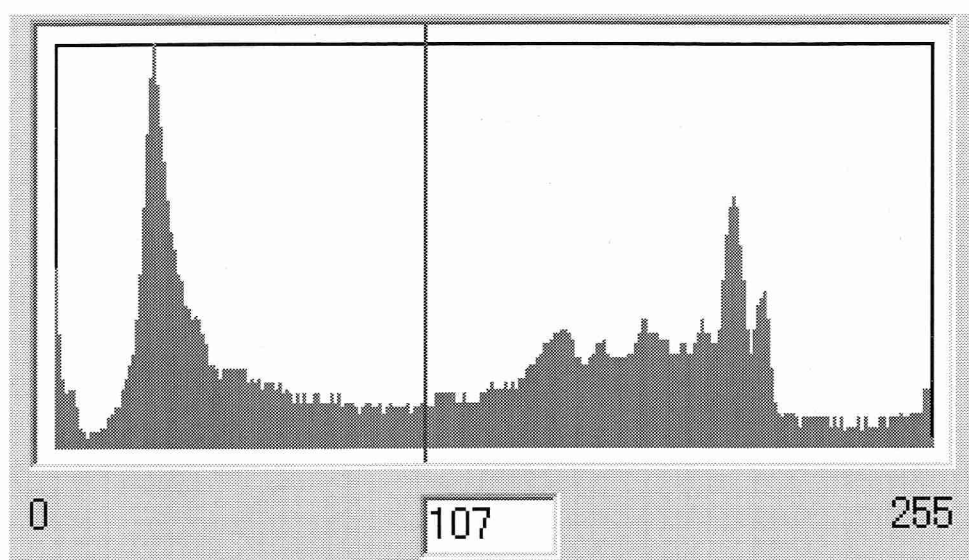


図 3.4 ヒストグラム法より閾値を決める

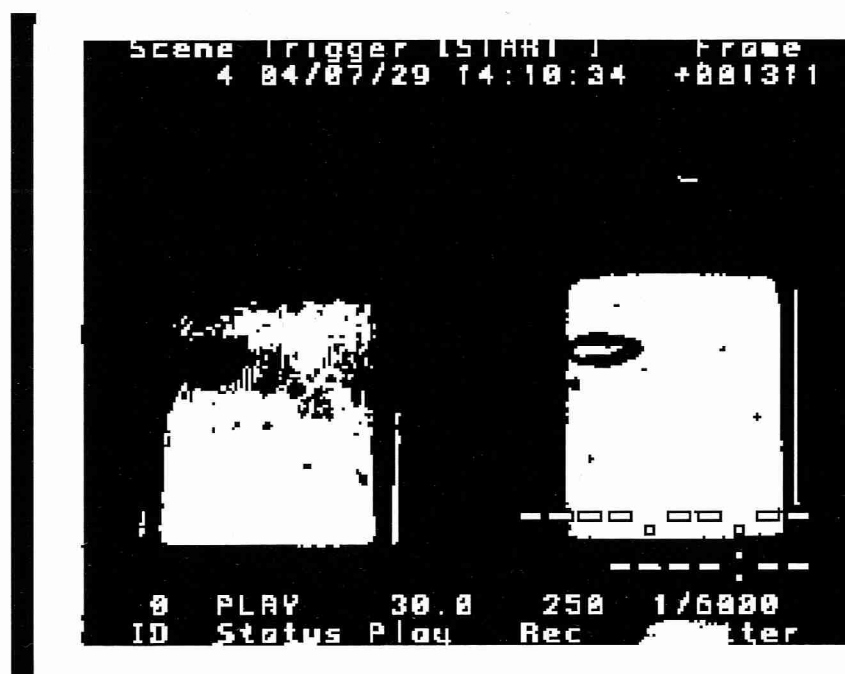


図 3.5 モード法の結果

この結果から見ると、左の気泡の周りは黒くていい結果ではない、これは画像中の場所により平均的な濃度が変化しているわけである。

本研究では、可変閾値法を採用した、結果を図 3.6 に示す。

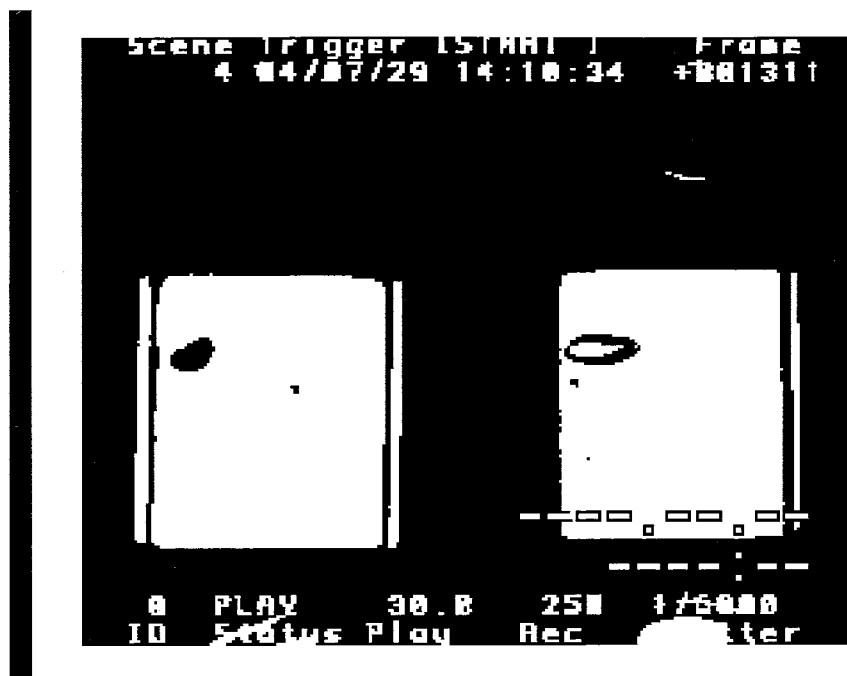


図 3.6 可変閾値法の結果

この二つの方法の結果を比べて見ると、可変閾値法のほうが良い結果であると分かる。

### 3.5 画像処理範囲の切出し

今まで処理した画像は、周りの黒い部分はこの後の処理には意味がないし、それに画像の大きさにより処理の時間もかかる。本研究では気泡がある部分だけを注目する、そのために対象とする部分を切り出す。

画像処理範囲を自動的に切出した結果を図 3.7 に示す。

### 3.6 背景差分

背景差分は、事前に背景画像を作成し、入力画像との差分をとることにより、動物体を抽出する方法である。初期背景画像は、指定した数フレームを用い、各画素における平均、最頻値、中位値等によって作成される。

背景差分の結果を図 3.8 に示す。

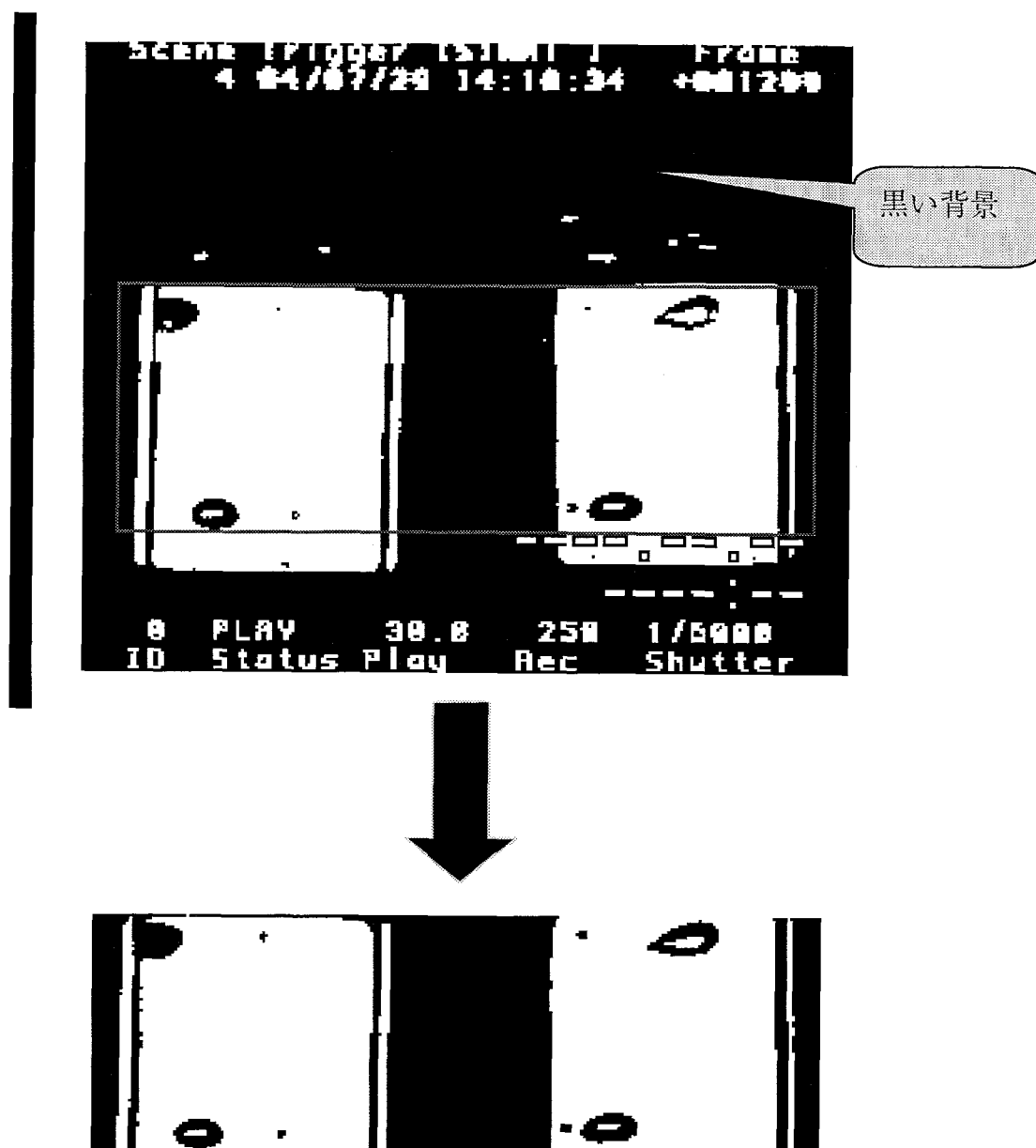


図 3.7 画像処理範囲の切出し

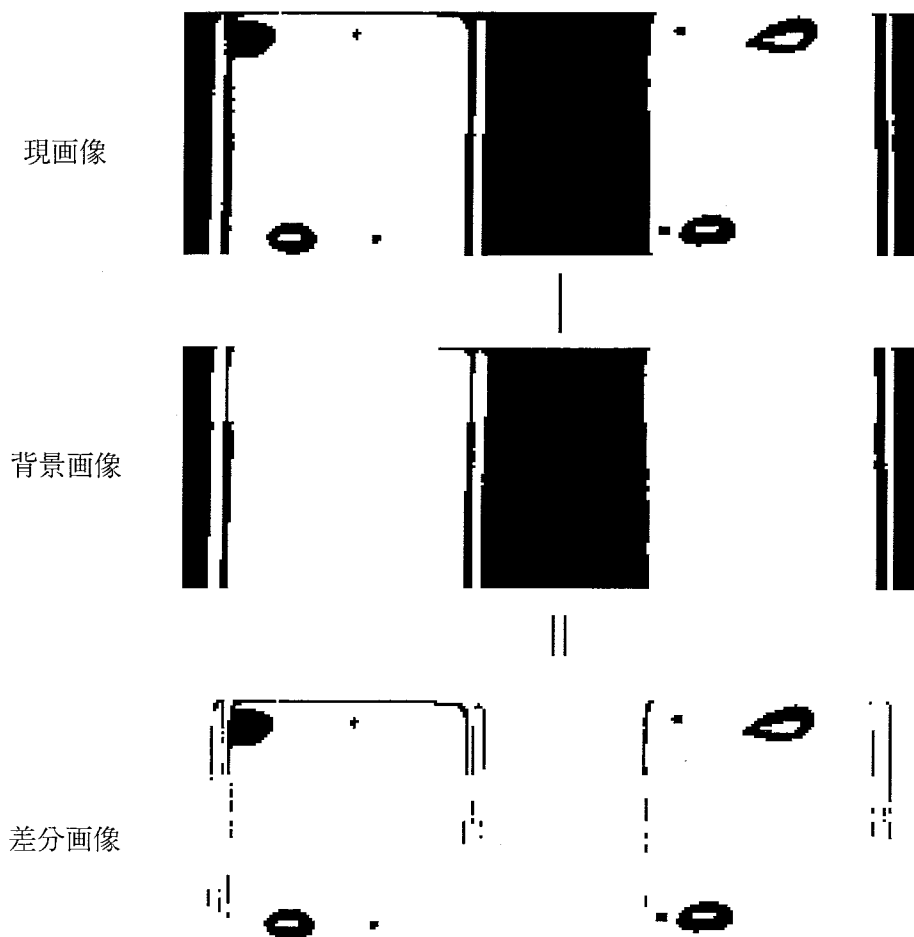


図 3.8 背景差分

### 3.7 雑音除去

2 値化によって気泡領域と共に微小な気泡や枠が誤抽出されることがある．気泡領域外の小さい気泡等の不要情報を雑音として除去処理を行なう．図 3.3 がその例である．これら不要情報を削除するために：

**膨張と収縮**を行なう．膨張とは，ある画素の近傍（4 近傍，8 近傍）に一つでも 0（黒）があればその画素を 0 にする処理である．逆に，収縮とは，ある画素の近傍に一つでも 255 があればその画素を 255 にする処理である．

膨張→腐食と作用させると，結果の画像は膨張で太って，収縮でやせて，結果的にほとんど変わらないが，気泡中の白い孤立した雑音が膨張のときに取り除かれる．逆に，収縮→膨張と作用させると，背景の黒い孤立した雑音が腐食のときに取り除かれる．

閾値雑音除去処理を行なう。この処理により気泡領域外の小さい気泡を除去することができる。閾値雑音除去というのは、画像の中にある面積閾値より小さい部分を雑音として削除することである。

本研究では最も単純な 8 近傍収縮処理と 8 近傍膨張処理を用いる。腐食→膨張を行なって、白い背景の中に黒い孤立の雑音点を取り除く。そして面積閾値を 50 設定した上で、収縮→膨張で除かれない微小な気泡を取り除いた。

雑音除去の効果を図 3.10 に示す。



雑音除去

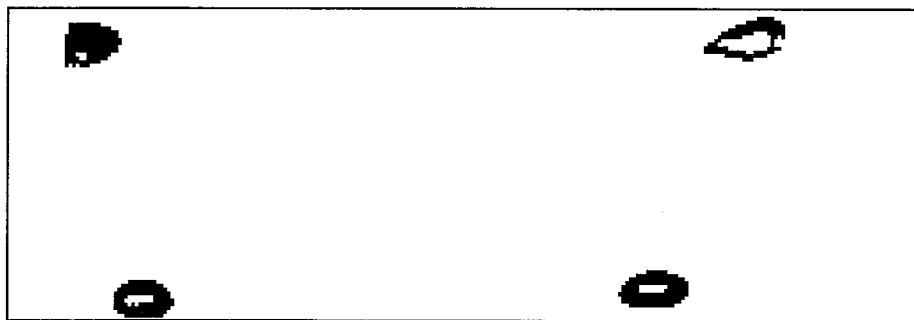
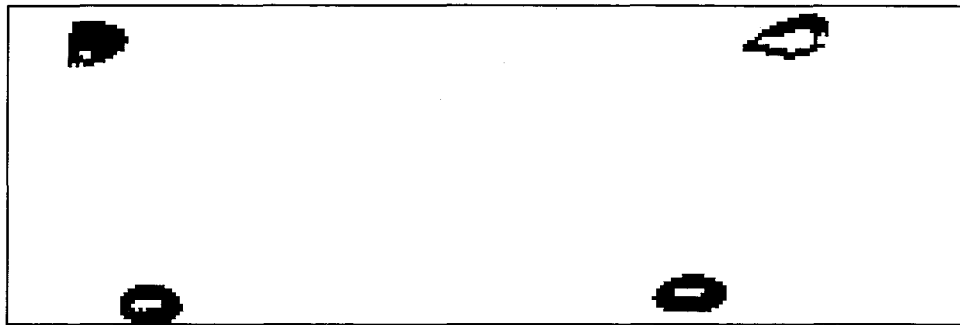


図 3.9 雑音除去

### 3.8 気泡領域内部の穴埋め処理

気泡領域内部に、図 3.4 に示すような空間が生じることがある。この原因は主として、2 値化で用いた 2 つのしきい値のうち低いしきい値のレベルが気泡濃度値よりも高い時に発生しており、従って気泡領域以外の情報とみなすことに依る。この空間を埋める穴埋め処理の詳細を図 3.5 に示す。すなわち、まず気泡候補画像を 255,0 反転することで対象を気泡領域から背景等に移シラ

ベリリングを行なう。その後、画像の外縁にかかるラベルは背景とみなしてそのラベル領域の値を '255' とし、それ以外の領域をすべて値 '0' として最終的な気泡マスクが完成する。



穴埋め処理

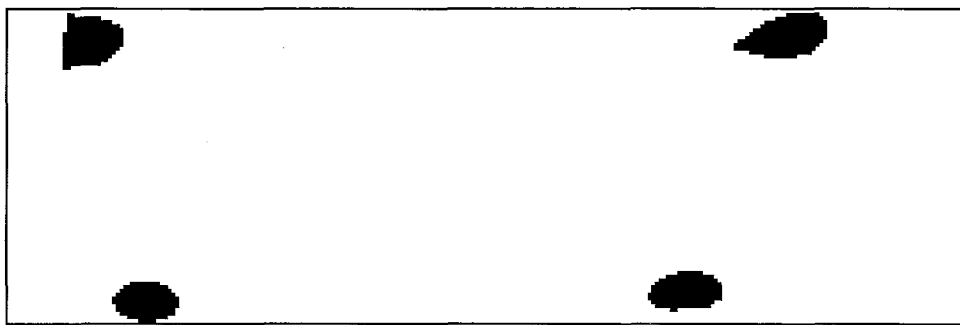


図 3.10 穴埋め処理

### 3.9 動態マッチングによる気泡の同定

画像のマッチングとは、2枚の画像の照合、あるいは1枚の画像とそのモデルの間の照合を行なうことである。照合をとるレベルにより、画素データレベルのマッチングと、画像から抽出した特徴のレベルにおけるマッチングに分けられる。後者では、特徴記述間をの関係を照合する必要があり、画像理解の方法にも関連している。主な方法には、相関法、残差逐次検定法がある。



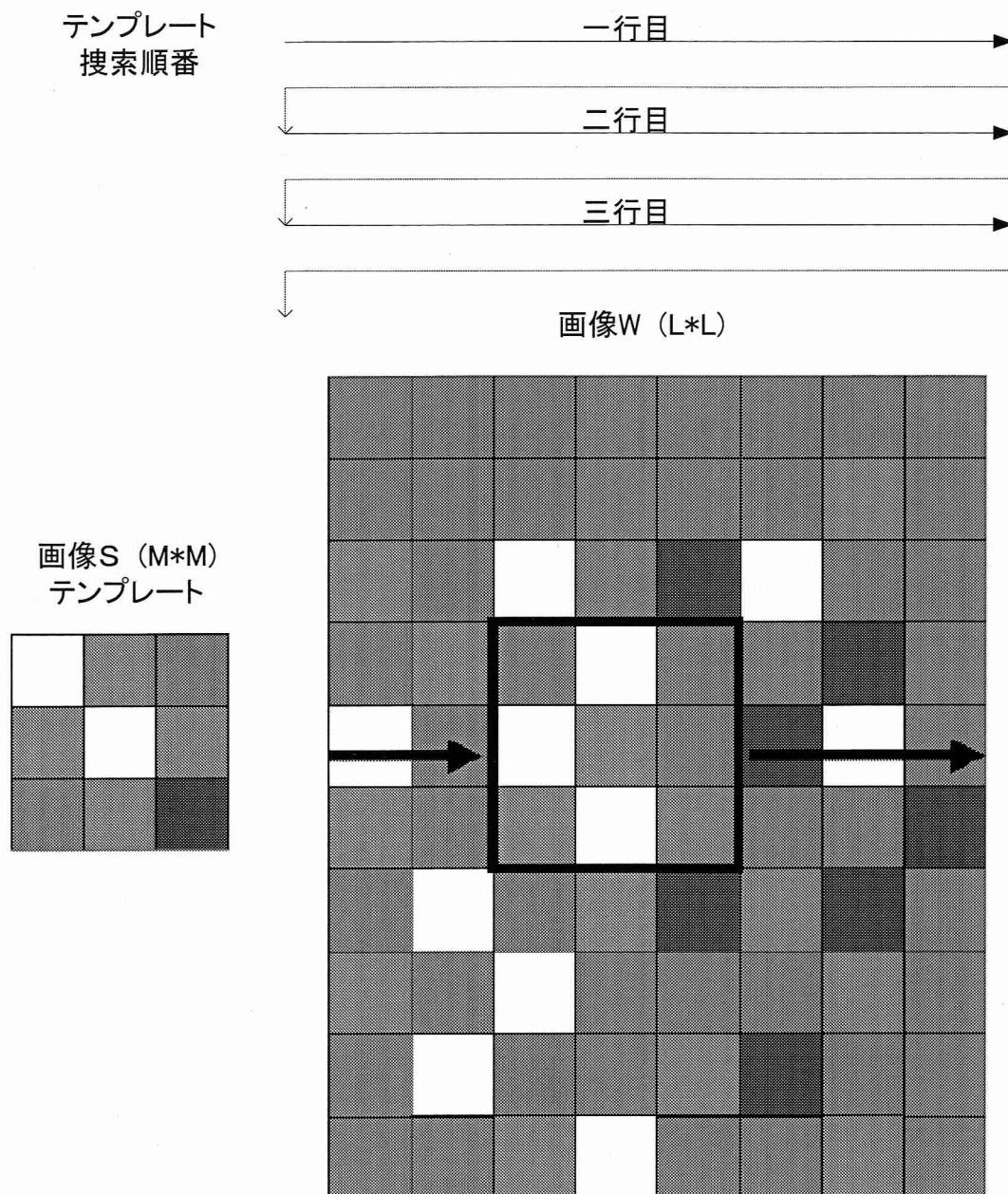


図 3.11 テンプレートマッチング

**相関法** 図 3.11 のように,  $W(i, j)$  を大きさ  $L \times L$  の画像とし  $S(i, j)$  を大きさ  $M \times M$  の画像とする. 画像  $W$  が画像  $S$  のある部分に対応していることを知るために, を,  $1 \leq m \leq L - M + 1$ ,  $1 \leq n \leq L - M + 1$  の範囲で計算する.

$$R(m, n) = \frac{\sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^L S(i, j) \cdot W(i-m, j-n)}{\left[ \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^L S^2(i, j) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^L W^2(i, j) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.9.1)$$

この  $R(m, n)$  が最大値を取る  $(m, n)$  により画像  $S$  と  $W$  の関係が得られる．この計算は直接計算せずにフーリエ変換を用いることもできる．相関法の問題点は

( $\alpha$ ) ノイズに敏感で、ノイズがあるとピークが不鮮明になること、

( $\beta$ ) 計算コストが大きいこと

である．ノイズの対策には、信号理論的立場から改善を行なう方法が提案されている．

### 残差逐次検定法

この方法は、尾上らにより提案され[8]、SSDA (Sequential Similarity Detection Algorithm) と呼ばれている．誤差の累積である残差には、

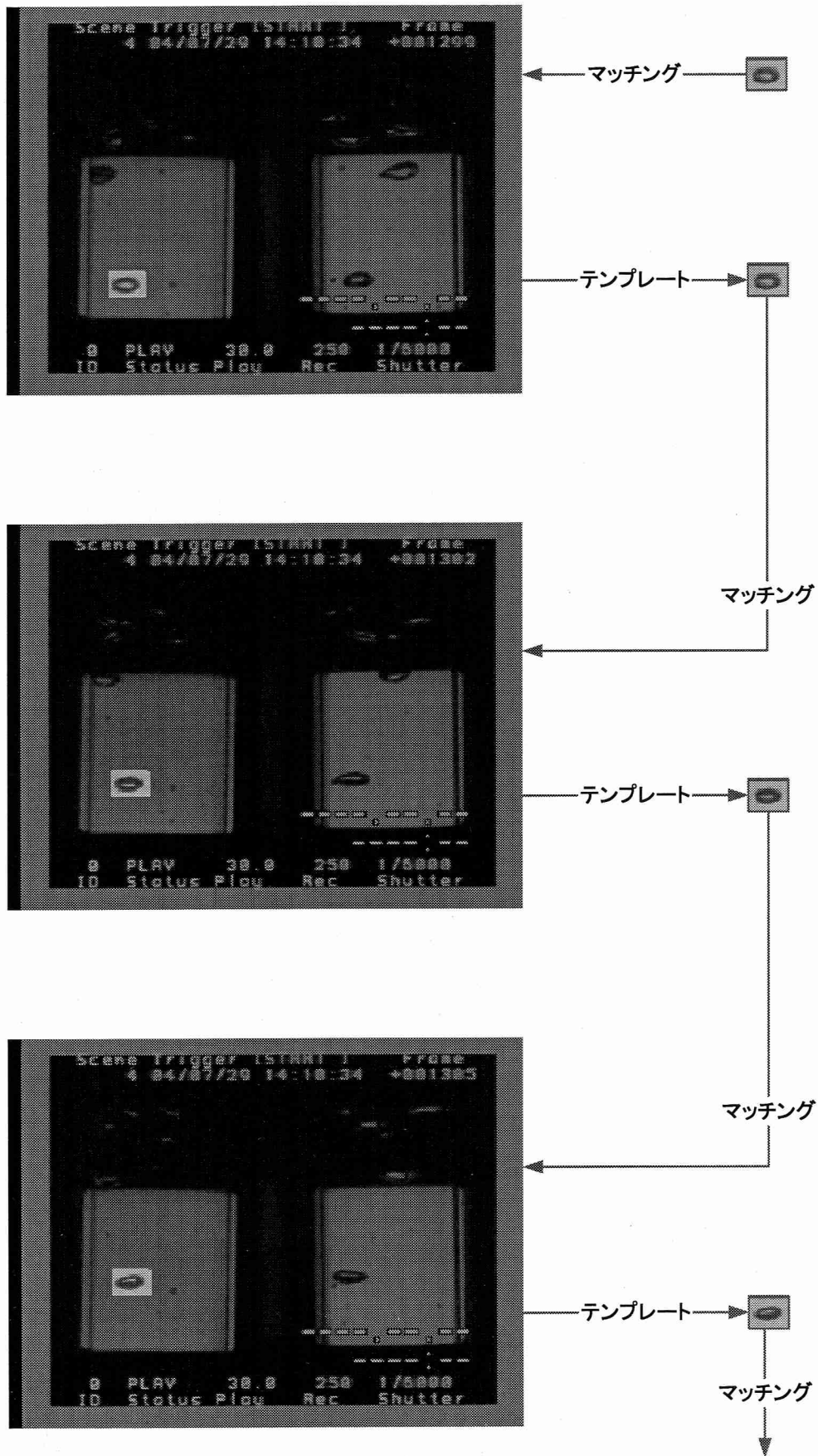
$$e(m, n) = \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^L |S(i, j) - W(i-m, j-n)| \quad (3.9.2)$$

を用いる．このとき、ウィンドウ内の全画素について残差を計算してしまわず、一定の順序でサンプリングを行ない、残差の中間結果を調べる．残差が早く増加していれば、閾値  $T$  を越えた時点で処理を打ち切る． $C$  のように残差の増加が遅い場合にはマッチングの可能性が高い．この方法は、相関法に比べて計算時間を大幅に改善することができる．閾値の与え方には固定閾値を与える方法と、調べるサンプル点数の増加に従って単調増加関数を与える方法がある．また、ウィンドウ内で最後まで誤差を加算した場合の残差に基づいて、閾値を自動的に決める方法も提案されている．

このほかに、始めから全テンプレートを適用せずに部分テンプレートを適用し、その結果に基づいて全テンプレートを用いる２段階テンプレートマッチング法や、最も解像度の高い画像上でマッチングをせず、あらかじめ粗い画像を用意して探索効率を改善する方法などがある．

本研究では、計算速度を上げるために、残差逐次検定法を採用した．

気泡は不定形物体として、時間によって気泡の形はずっと変わる、特に乱流が強い二相流の中の気泡は時間がたつと対応する気泡の形が随分変わって、元のテンプレートをずっと使用するとマッチングの結果が間違いやすくなる．ここでは、動態テンプレート手法を提案する．動態テンプレート手法というのは、今のマッチングの結果から変化した気泡を切り出して次のテンプレートとして用いる、このようマッチングを繰り返して、より正確な結果を得る．



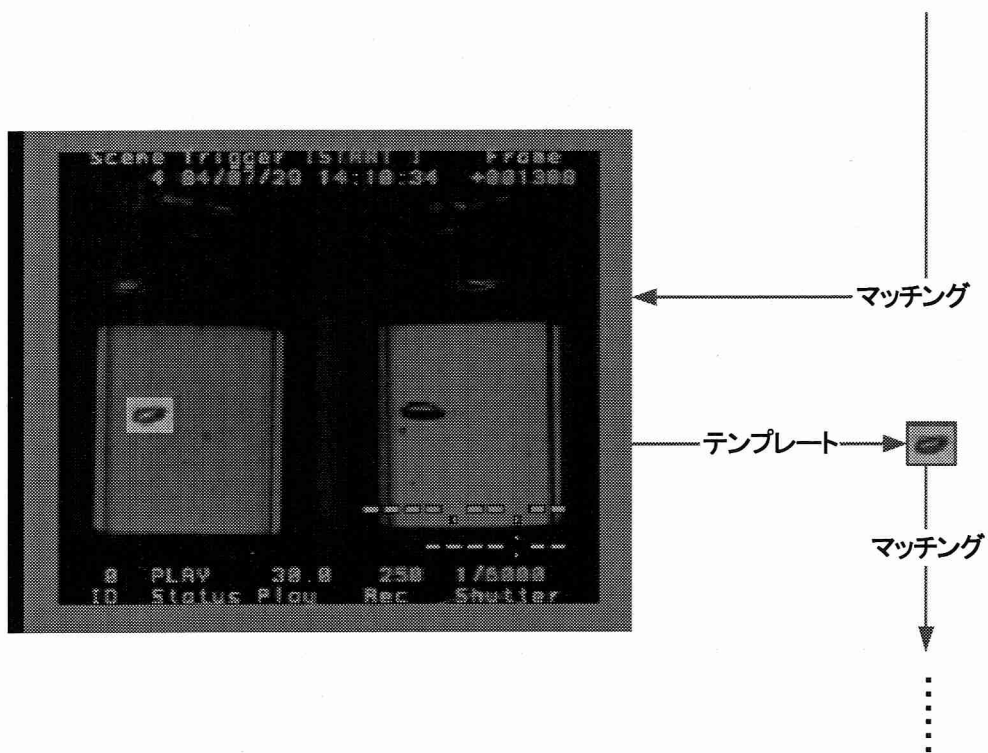


図 3.12 マッチングの結果

本研究で提案した動態マッチング方法は、実験によって複数の気泡が有る時に特定な一つの気泡を追跡することもできることが分かった。複数の気泡がある時の単一気泡の追跡結果は図 3.13 と示した。



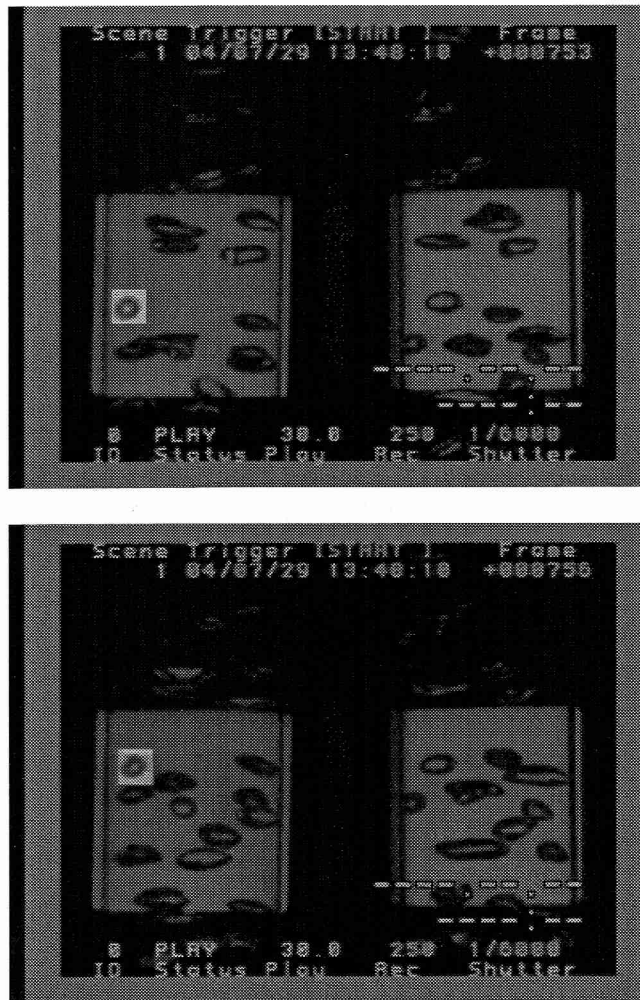


図 3.13 複数気泡の条件下で気泡の動態マッチング

### 3.10 ラベリング

連結成分に同じラベル（番号）を付け、異なった連結成分には異なった番号を付ける処理をラベリングという。この処理により個々の連結成分をそれぞれ分離して扱うことが出来る。ラベリングは各種の手法が提案されているが、本研究では以下の方法に従ってラベリングを行った。

- ① 画像上を左上から右下に向け走査し、画素値が1であり、かつラベルが付けられていない画素 $P$ を見つけ、新しいラベルを付ける。
- ② 画素 $P$ に対して、連結している画素に同じラベルを付ける。
- ③ 更に、今ラベル付けした画素と連結しているすべての画素に同じラベルを付ける。
- ④ この走査を、ラベル付けすべき画像がなくなるまで続ける。これで、一つの連結成分全体に同じラベルが付けられたことになる。

- ⑤ また①に戻り、まだラベルの付けられていない画素が見つかったら、新しいラベルを付けて②～④の処理を行う。
- ⑥ 画像全体の走査が終わったとき、全ての処理が終了する。

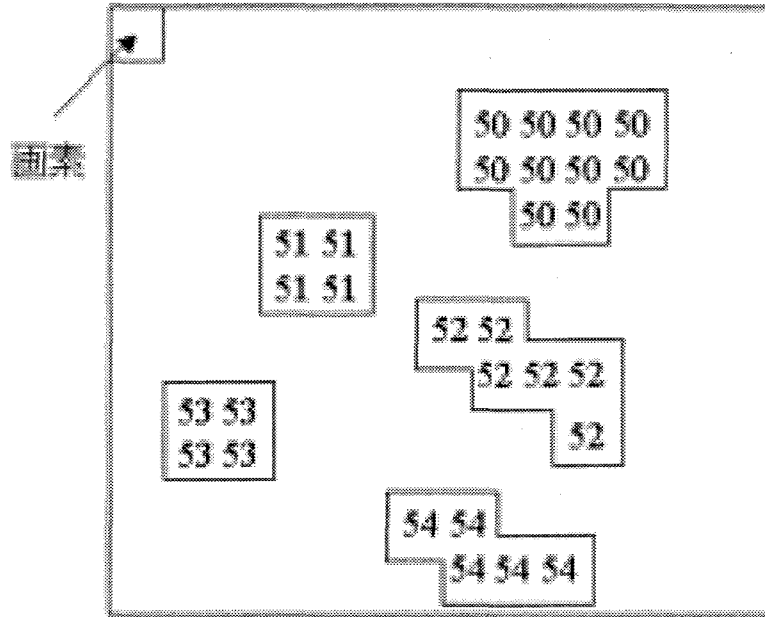


図 3.14 ラベリング処理

このようにラベリングを行い、個々の連結成分に分ける。そして同じラベル番号の個数をその連結成分の面積とする。気泡の重心は、面積を座標値の総和で割ることにより求まる。測定対象ウィンドウ内の有効画素の X 座標および Y 座標の座標値を順次加算し、 $\sum X$  および  $\sum Y$  を算出する。重心の座標は式(3.7.2)と(3.7.3)により平面重心点座標が求められる。ここで、 $s$  は気泡の範囲、 $M$  は対象とする点の数である。なお  $z$  については式(3.10.3)から計算できる。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{xi \in S} xi}{M}, \bar{z}_x = \frac{\sum_{zi \in S} zi}{M} \quad (3.10.1)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{yi \in S} yi}{M}, \bar{z}_y = \frac{\sum_{zi \in S} zi}{M} \quad (3.10.2)$$

$$\bar{z} = \frac{z_x * s_{xz} + z_y * s_{yz}}{s_{xz} + s_{yz}} \quad (3.10.3)$$

検出を目的としている気泡のみが検出される。図 3.7 にラベリングされた画像の様子を示す。

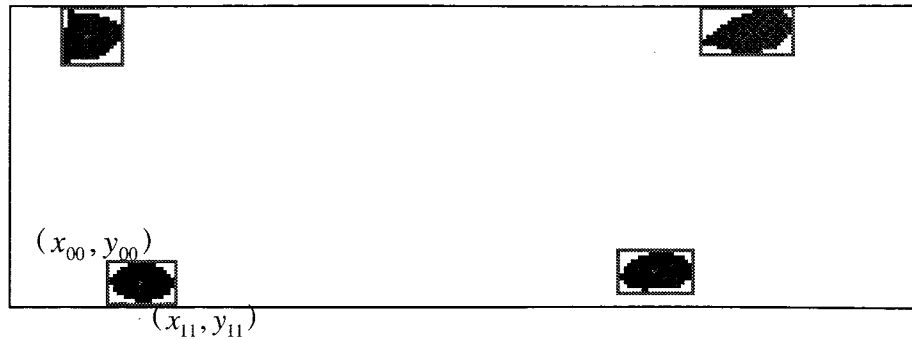


図 3.15 ラベリング処理

ラベリングの結果として、気泡を囲む長方形の左上の点の座標( $x_{00}, y_{00}$ )と右下の点の座標( $x_{11}, y_{11}$ )、及び気泡の重心座標、投影面積などの情報を出力する、表 1 にその出力データを示した：

Image No.	Bubble No.	Left X Co	Top Y Co	Right X Co	bot. Y Co	CG Co	X CG Co.	Y CG	Bubble areas
1	0	29	4	46	15	37	9	139	
1	1	169	7	190	18	179	12	160	
1	2	14	70	31	83	22	77	164	
1	3	194	73	218	83	206	78	181	
2	0	27	0	46	12	36	6	150	
2	1	170	3	191	15	180	9	166	
2	2	14	67	31	83	21	75	182	
2	3	193	70	219	83	207	76	214	
3	0	29	4	46	15	37	9	139	
3	1	169	7	190	18	179	12	160	
3	2	14	70	31	83	22	77	164	
3	3	194	73	218	83	206	78	181	
4	0	28	7	47	18	37	12	138	
4	1	163	10	189	21	177	15	177	
4	2	14	69	32	83	22	78	136	
4	3	193	76	217	83	204	79	112	
5	0	29	11	47	22	38	16	127	

5	1	163	14	188	24	176	18	172
5	2	14	69	34	83	22	78	103
5	3	193	78	212	83	202	80	53
6	0	29	15	48	26	38	20	134
6	1	163	18	188	28	175	22	175
7	0	29	19	48	30	38	24	132
7	1	163	21	187	32	174	26	174
8	0	28	24	48	34	37	29	137
8	1	163	26	186	36	174	31	160
9	0	27	28	47	38	36	33	138
9	1	163	30	187	40	174	35	157
10	0	26	33	46	43	35	37	136
10	1	163	35	187	44	174	39	159
11	0	25	37	44	48	34	42	130
11	1	163	39	188	49	175	43	173
12	0	24	41	42	53	33	46	134
12	1	163	44	188	54	174	48	177
13	0	22	45	39	58	31	51	132
13	1	162	47	188	59	174	53	208
14	0	20	49	37	62	28	55	138
14	1	161	51	189	63	174	57	236
15	0	18	53	34	66	26	59	141
15	1	163	55	190	68	176	61	238
16	0	18	56	33	71	25	63	146
16	1	167	58	191	72	179	64	228
17	0	14	60	33	83	22	68	206
17	1	171	62	194	75	182	68	214
18	0	14	63	32	83	22	71	201
18	1	174	65	196	79	185	72	204
19	0	14	67	33	83	23	75	207
19	1	178	69	199	83	188	76	206



20	0	14	69	34	83	23	77	179
20	1	181	74	202	83	191	78	142

表 2 ラベリングの結果

座標	1 枚目	2 枚目	3 枚目	4 枚目	5 枚目	6 枚目	7 枚目
x	60	61	63	64	65	66	66
y	21	22	22	23	23	23	22
z	7.58	10.61	13.69	17.15	21.13	25.14	30.08
座標	8 枚目	9 枚目	10 枚目	11 枚目	12 枚目	13 枚目	14 枚目
x	66	66	65	66	66	66	64
y	21	20	19	18	16	13	11
z	34.06	38.08	42.57	47.14	52.22	56.26	60.26
座標	15 枚目	16 枚目	17 枚目	18 枚目	19 枚目		
x	61	58	55	52	49		
y	10	7	7	8	8		
z	63.61	68.00	71.50	75.50	77.44		

表 3 気泡重心の三次元座標

三次元の運動ベクトルは：

	運動ベクトルX軸方向	運動ベクトルY軸方向	運動ベクトルZ軸方向	運動ベクトル大きさ	単位運動ベクトルX	単位運動ベクトルY	単位運動ベクトルZ
1→2	1	1.00	3.03	3.34	0.299062	0.299062	0.906159
2→3	2	0.00	3.08	3.67	0.544605	0	0.838692
3→4	1	1.00	3.46	3.74	0.267533	0.267533	0.925663
4→5	1	0.00	3.98	4.10	0.243682	0	0.969855
5→6	1	0.00	4.01	4.13	0.241966	0	0.970285
6→7	0	-1.00	4.94	5.04	0	-0.1984	0.98012
7→8	0	-1.00	3.98	4.10	0	-0.24368	0.969855
8→9	0	-1.00	4.02	4.14	0	-0.2414	0.970426
9→10	-1	-1.00	4.49	4.71	-0.21243	-0.21243	0.953807
10→11	1	-1.00	4.57	4.78	0.209038	-0.20904	0.955304

11→12	0	-2.00	5.08	5.46	0	-0.36633	0.930484
12→13	0	-3.00	4.04	5.03	0	-0.59618	0.802853
13→14	-2	-2.00	4.00	4.90	-0.40825	-0.40825	0.816497
14→15	-3	-1.00	3.35	4.61	-0.65121	-0.21707	0.727188
15→16	-3	-3.00	4.39	6.11	-0.49139	-0.49139	0.719072
16→17	-3	0.00	3.50	4.61	-0.65079	0	0.759257
17→18	-3	1.00	4.00	5.10	-0.58835	0.196116	0.784465
18→19	-3	0.00	1.94	3.57	-0.83972	0	0.543019

表 4 三次元運動ベクトル分析表

### 3.11 結果解析

ボイド率は、気液二相流の特性を研究するには非常に重要なパラメーターです。

ボイド率の計算式はこの式のように示して、あるいは簡単な言うとボイド率は流体に対する気相の体積割合です。

本研究では、気泡を楕円体と仮定するために、気泡のボイド率の計算式は以下の式とおりに計算することが出来る。

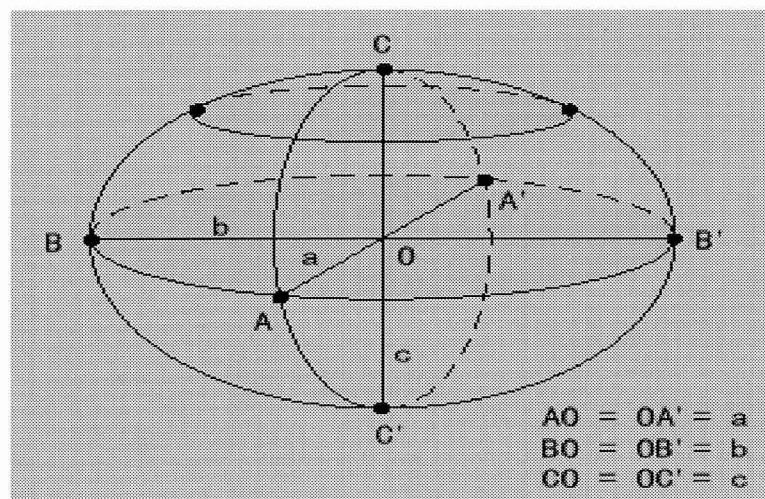


図 3.16 楕円体と仮定する気泡の径情報

$$\alpha = \frac{\sum_{n=1}^N V_b}{V}$$

$$\alpha = \frac{\sum_{n=1}^N V_b}{V} \quad (3.10.4)$$

ここではそれぞれ a, b, c 3 本の主軸である。V は処理範囲体積、N は V 中の気泡数である。

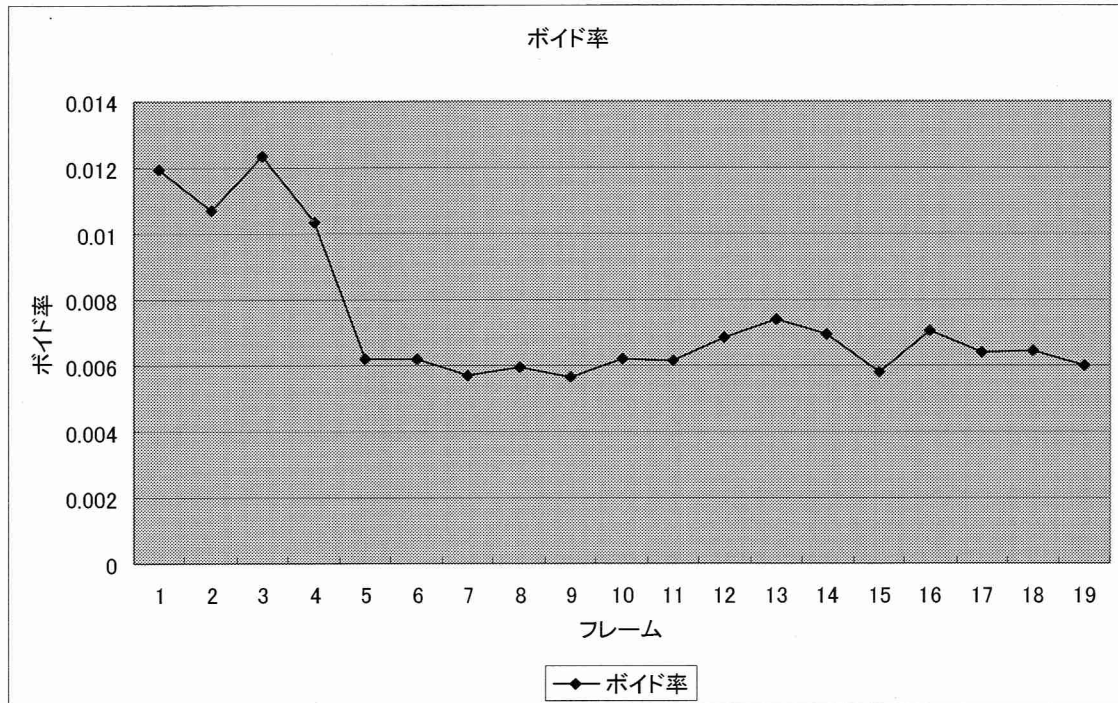


図 3.17 ボイド率

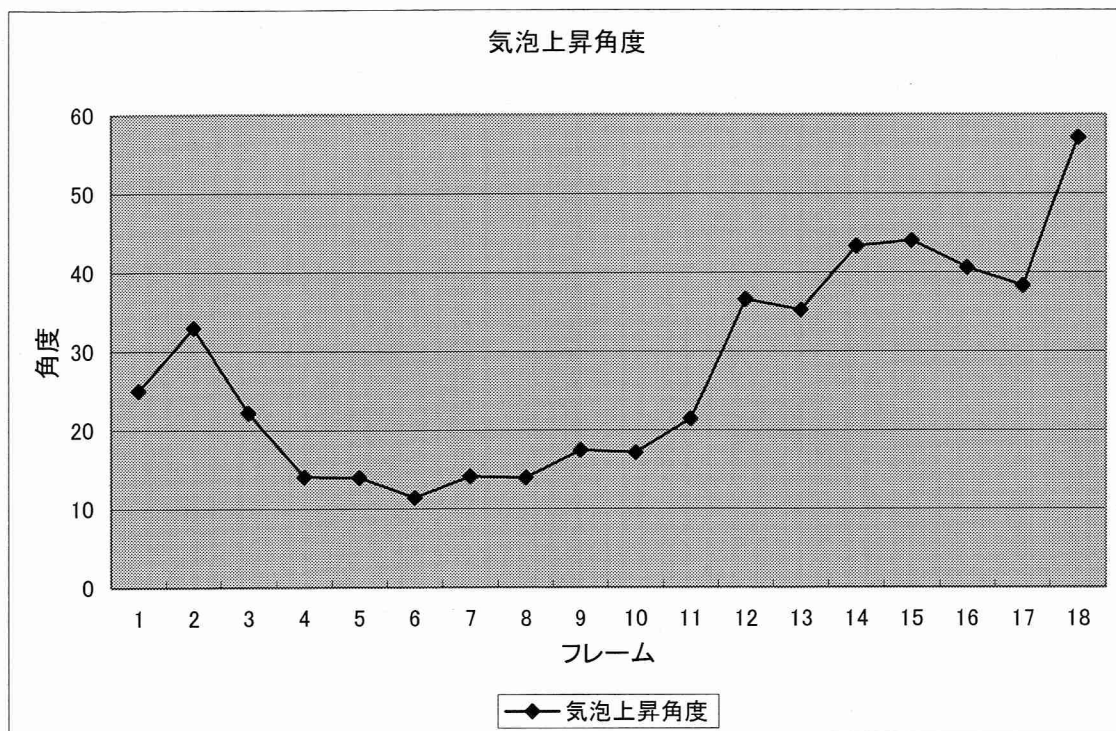


図 3.18 気泡上昇角度

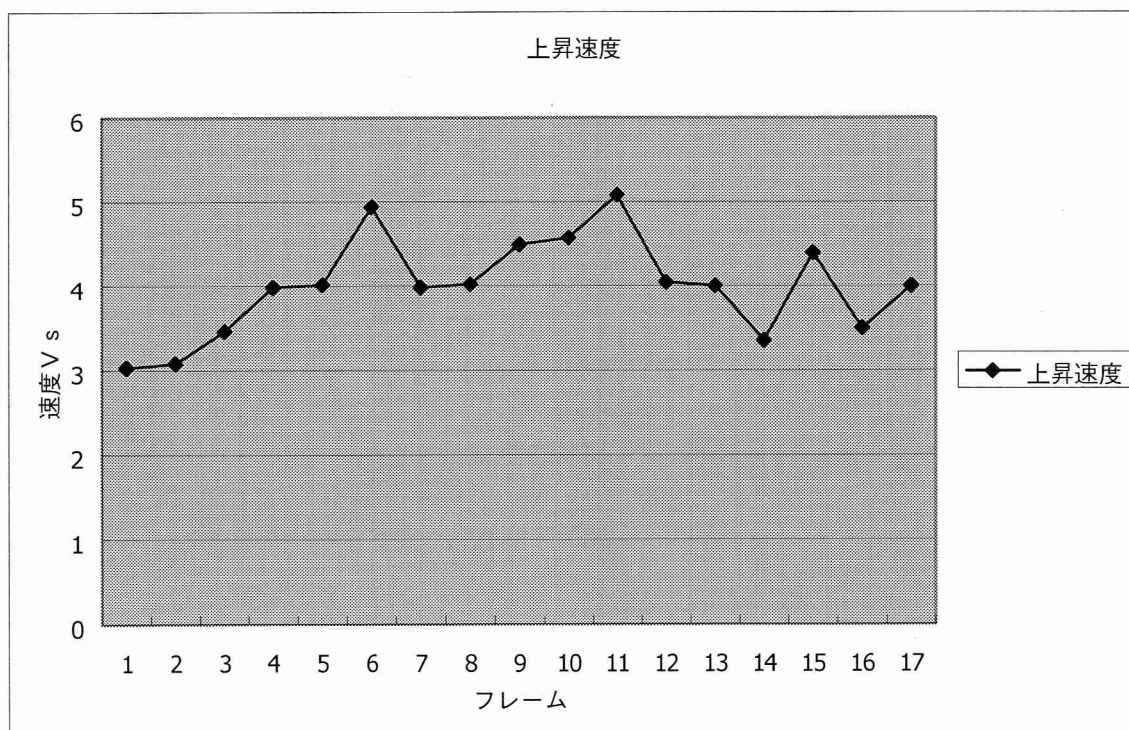


図 3.19 気泡の上昇運動速度 (運動ベクトル Z 軸での投影)

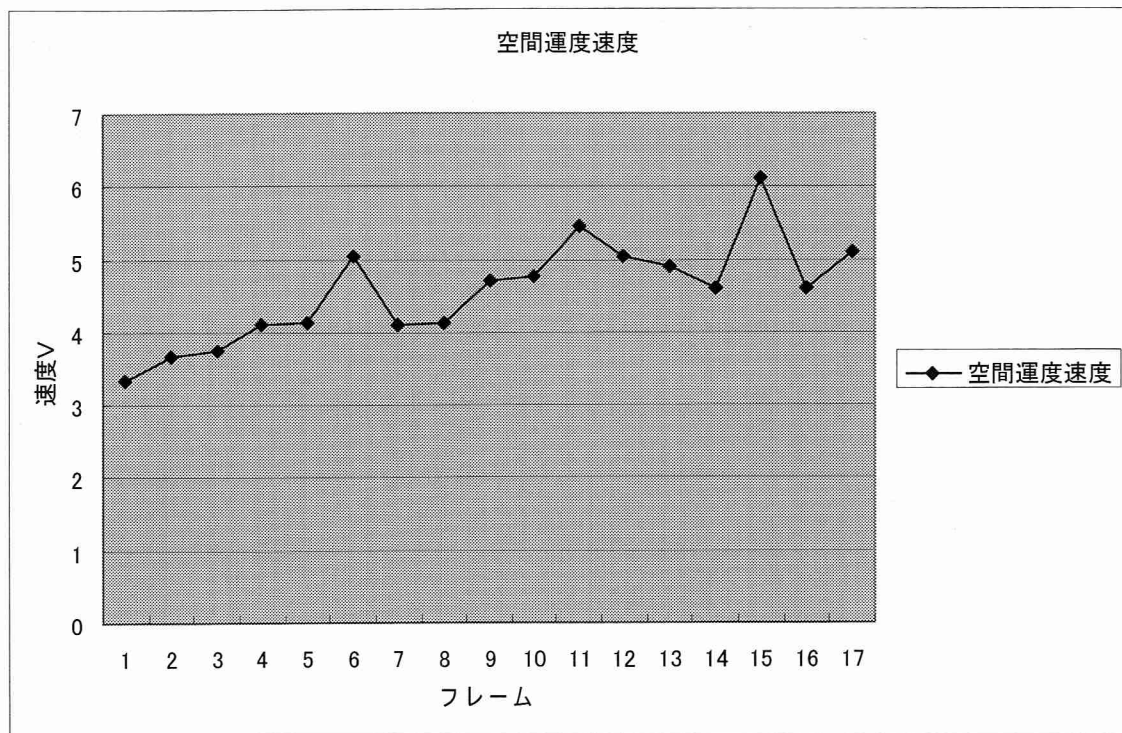
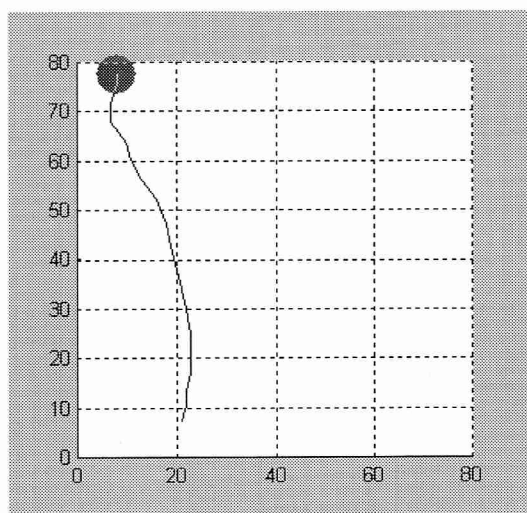
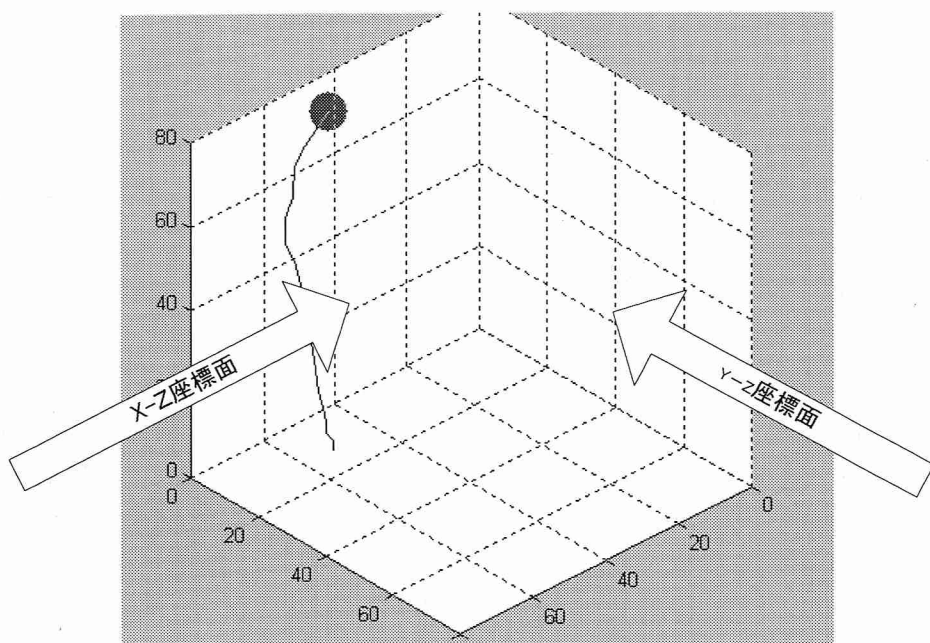


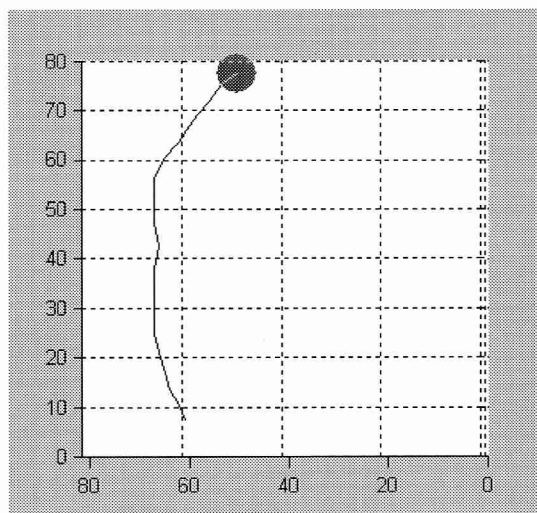
図 3.20 気泡の運動速度（運動ベクトルの大きさ）

### 3.12 運動気泡三次元モデル

本研究では、Matlab により気泡の重心座標情報を用いて気泡の三次元運動モデルを構築した。下の図のように示す。



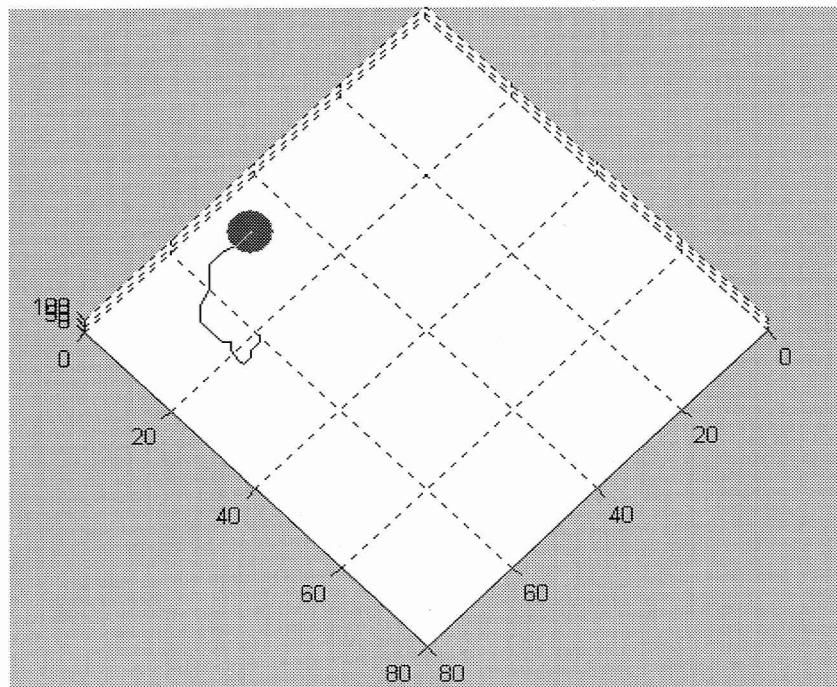
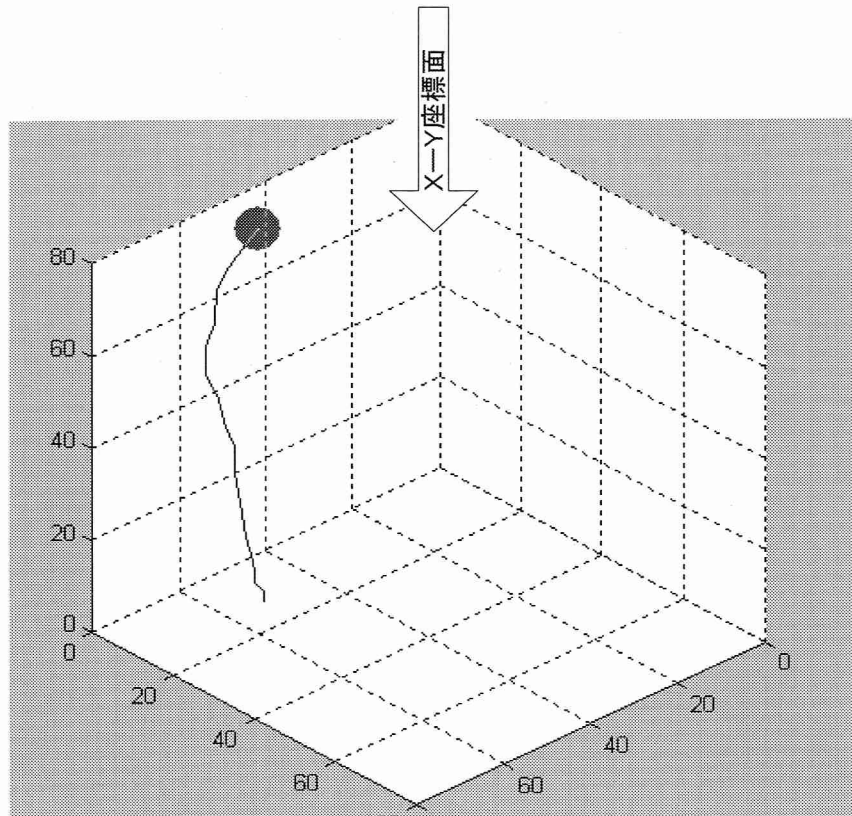
X-Z座標面投影



Y-Z座標面投影

図 3. 21 三次元モデルと X-Z,Y-Z 面の投影





X-Y座標面投影

図 3. 22 三次元モデルと運動遺跡の X-Y 面の投影

この三次元モデルによって、気液二相流中の気泡運動に及ぼす液相乱れ、気泡間相互作用の影響及び気泡は細管中の位置、上昇速度、上昇角度などの物理量を直観的に観察することができる。



## 第4章 オプティカルフローの推定

### 4.1 はじめに

気泡乱流中の気泡運動に及ぼす液相乱れ、気泡間相互作用の影響を調べるために、本研究では気泡表面の運動、形状の三次元画像計測をオプティカルフロー手法で解析する。

気泡の姿勢の推定および追跡を行うため、同一物体上では同じ性質をもつオプティカルフローを活用する。オプティカルフローは、動画像において連続するフレーム間の対応する各点を対応づけることにより各点の運動ベクトルを推定する手法である。また、フローベクトルは、局所的、平面的ではあるが運動情報(各点における運動ベクトル)、領域情報(同一性質をもつフローベクトルは同一物体上の点である)として有効である。

動画像からの速度の検出に関する研究は1970年ころより行われている。多くの論文では、動画像中の濃淡パターンの対応づけの考え方をもとに速度場(画像中の各点に速度ベクトルを対応させたもの)を計算する手法が一般的である。こうした対応づけの考え方にに基づき動画像より検出される見かけの速度場に相当するものが、オプティカルフローベクトルとよばれる。従来より提案されている代表的な検出法は、マッチング法、グラディエント法などに大別される。連続する画像フレーム間において濃淡パターンの対応づけを実行し、得られる変位ベクトルからその地点での動きベクトルを決定する手法がマッチング法とよばれる。通常、適当なサイズのテンプレートを用い、空間相互相関などの解析法により対応づけを行う。本研究ではグラディエント法を用いる。これは、濃淡パターンの特徴を表す画像関数(明度関数)が運動に際し不変に保たれるとの仮定より、ある点 $(x; y)$ における動きベクトルの速度と、動画像の濃淡分布の空間勾配および時間勾配とを関係づける式(拘束方程式)をもとに速度ベクトルを検出する解析手法である。しかしグラディエント法を用いる上で考慮しなければならないのは、本研究のように気泡表面の運動のパラメータを推定する場合、マッチング法は、直接的な対応づけにより移動ベクトルを得るものであるが、グラディエント法は、フレーム間隔が非常に短い場合を想定しており、速度場での解析が中心となっている。図4.1に示すように、気泡表面運動においては移動ベクトルと速度ベクトルは異なるということである。

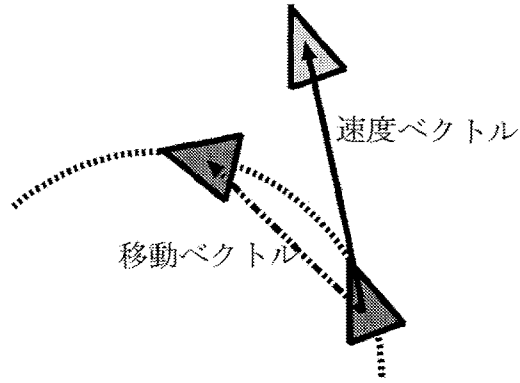


図 4.1 移動ベクトルと速度ベクトルの違い

## 4.2 オプティカルフロー

### 4.2.1 オプティカルフローの拘束方程式

動画像中の時刻  $t$  における点の画素位置  $(x, y)$  の明度を  $E(x, y, t)$  と表す. 微小時間  $\delta t$  後の時刻  $t + \delta t$  の点  $(x + \delta x, y + \delta y)$  における明るさは不変と仮定すると次式が成り立つ.

$$E(x, y, t) = E(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \quad (4.2.1)$$

上式の右辺を Taylor 級数展開すると,

$$E(x, y, t) = E(x, y, t) + \delta x \frac{\partial E}{\partial x} + \delta y \frac{\partial E}{\partial y} + \delta t \frac{\partial E}{\partial t} + e \quad (4.2.2)$$

ここで  $e$  は  $\delta x, \delta y, \delta t$  に関する 2 次以上の高次の項で微小であるとし無視する.

両辺を  $\delta t$  で割り,

$$\frac{\delta x}{\delta t} \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\delta y}{\delta t} \frac{\partial E}{\partial y} + \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (4.2.3)$$

$\delta t$  の極限として  $\delta t \rightarrow 0$  とすると, 次式を得る.

$$\frac{\partial E}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial E}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (4.2.4)$$

ここで，見かけの速度ベクトルを  $u = \frac{dx}{dt}$ ,  $v = \frac{dy}{dt}$ , 空間的な明度勾配を  $E_x = \frac{\partial E}{\partial x}$ ,  $E_y = \frac{\partial E}{\partial y}$ , 時間的な明度勾配を  $E_t = \frac{\partial E}{\partial t}$  とすれば，次のように書き直せる．

$$E_x u + E_y v + E_t = 0 \quad (4.2.5)$$

これはフローベクトルの成分  $u$  と  $v$  に関する拘束を表しているためオプティカルフローの拘束方程式と呼ばれる． $u$ ,  $v$  を座標軸とする 2 次元空間(速度空間)(図 3.2) を考えるとオプティカルフローの拘束方程式を満足する  $(u, v)$  の値は速度空間上で拘束直線上にある．このような局所的計測では拘束直線を決定することのみが可能である．また，拘束方程式は以下の形式で書かれることもある．

$$\Delta I(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{v} + I_t(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (4.2.6)$$

ここで

$$\mathbf{x} = (x, y), I(\mathbf{x}, t) = E(x, y, t), \mathbf{v} = (u, v)^T, \\ I_t(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial I(\mathbf{x}, t)}{\partial t}, \Delta I(\mathbf{x}, t) = (I_x(\mathbf{x}, t), I_y(\mathbf{x}, t))$$

実際にフローベクトルを求めようとすれば，式(4.2. 6) だけでは一意に決定できない．そこでもうひとつの拘束条件として Lucas, Kanade の拘束条件を導入する．

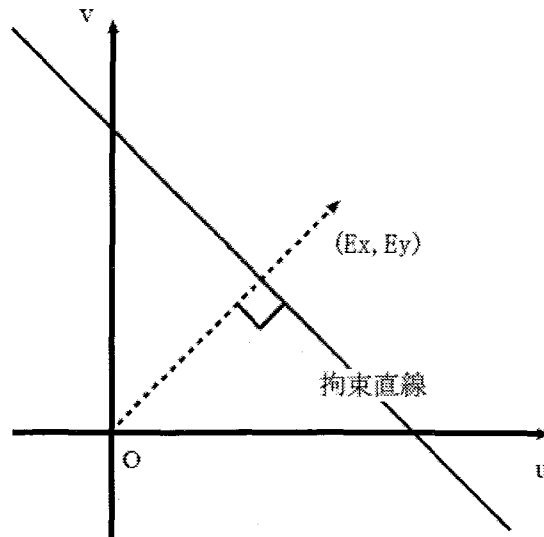


図 4.2 速度空間

#### 4.2.2 Lucas と Kanade の拘束条件

本研究では, Barron らが行った比較研究において最良の結果を得た Lucas と Kanade の拘束条件を用いる[10]。 Lucas と Kanade は, 「同一物体の濃淡パターン上の局所領域では, オプティカルフローはほぼ一定と考えられる, すなわち局所領域で得られるオプティカルフローの拘束方程式は同一の解をもつ」という仮定から, 局所的滑らかさの拘束を用いた。つまり, 各局所領域中のオプティカルフロー速度  $\mathbf{v}$  の拘束として, オプティカルフロー拘束方程式(4.2.6)の加重二乗和

$$\sum_{\mathbf{x} \in \Omega} W^2(\mathbf{x}) [\nabla I(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{v} + I_t(\mathbf{x}, t)]^2 \quad (4.2.7)$$

の最小化を考えた。ここで  $W(\mathbf{x})$  は近傍の周囲よりも中心における拘束に重きをおくための窓関数である。式(4.2.7)の解は,

$$A^T W^2 A \mathbf{v} = A^T W^2 \mathbf{b} \quad (4.2.8)$$

ここで単一時間における個の点  $\mathbf{x}_i \in \Omega [i = 1, \dots, n]$  に対して

$$\begin{aligned} A &= [\nabla I(\mathbf{x}_1), \dots, \nabla I(\mathbf{x}_n)]^T, \\ W &= \text{diag}[W(\mathbf{x}_1), \dots, W(\mathbf{x}_n)], \\ \mathbf{b} &= -(I_t(\mathbf{x}_1), \dots, I_t(\mathbf{x}_n))^T. \end{aligned}$$

式(4.2.8)の解は  $2 \times 2$  行列  $A^T W^2 A$  が正則なとき求まり,

$$\mathbf{v} = [A^T W^2 A]^{-1} A^T W^2 \mathbf{b}$$

ここで

$$A^T W^2 A = \begin{bmatrix} \sum_{\mathbf{x} \in \Omega} W^2(\mathbf{x}) I_x^2(\mathbf{x}) & \sum_{\mathbf{x} \in \Omega} W^2(\mathbf{x}) I_x^2(\mathbf{x}) I_y^2(\mathbf{x}) \\ \sum_{\mathbf{x} \in \Omega} W^2(\mathbf{x}) I_y^2(\mathbf{x}) I_x^2(\mathbf{x}) & \sum_{\mathbf{x} \in \Omega} W^2(\mathbf{x}) I_y^2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (4.2.9)$$

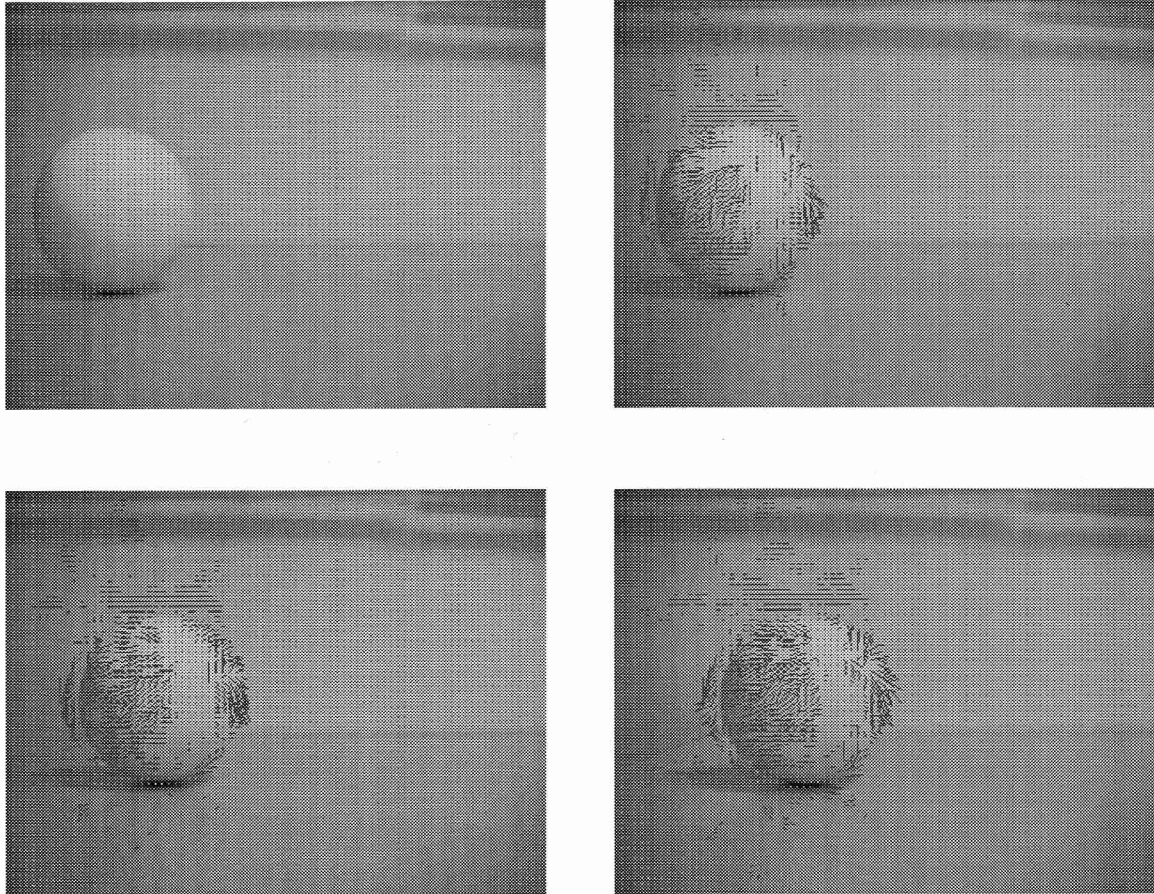


図 4.3 オプティカルフロー方法によるボール表面の運動ベクトル抽出

### 4.3 オプティカルフローの検出

オプティカルフローの抽出法は、大きく分けてマッチング法と、グラディエント法の 2 つがある。前者は、連続動画像においてフレーム間での直接的な対応づけにより移動ベクトルを抽出する手法である。後者は、時空間における勾配の拘束を用いた解析法であり移動ベクトルというより、速度場の解析が中心となっている。本研究では、グラディエント法による気泡の濃度画像にオプティカルフローの抽出を行い、フローベクトルを速度ベクトルとして活用することによって、速度場を用いた気泡の表面状態について検討する。

まず、動画像系列の各フレーム枚に気泡界面の運動推定を行うための前処理として、背景画像との差分により気泡の抽出を行う。オプティカルフローは、グラディエント法を用いているため、動画像中の濃淡パターンが滑らかに変化していることが条件となっているため計算する画像に対して画像を一様に滑らかにする正規関数(ガウス関数)をかける。この際、切り出した気泡領域画像を用いることによって背景による濃淡パターンの影響を無視することができる。そのため、シーン中の対象気泡の領域を正確に切り出す必要がある。

次に，初期フレームに続く時系列画像1枚を入力し，現フレームでの気泡界面速度パラメータを推定する．推定された速度パラメータを用いることにより，次フレームにおける気泡モデルの速度場候補を生成する．続く時系列画像を入力し，再びフローベクトルを求める処理に戻る．

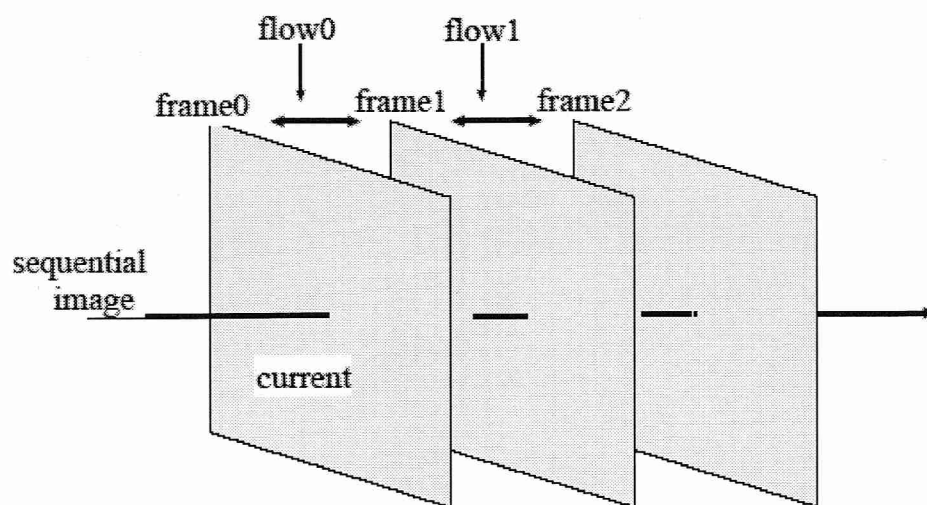
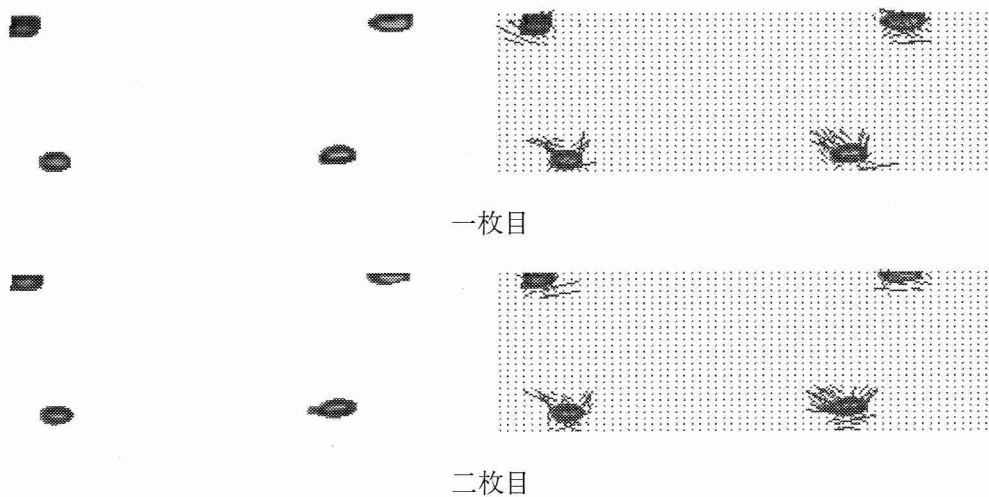
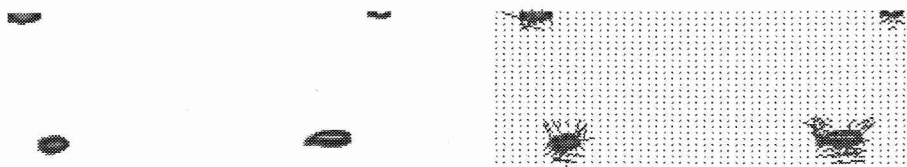


図 4. 4 オプティカルフローの計算

オプティカルフローを検出した結果を示す。図はそれぞれの入力画像から、次のフレームの画像を用い、オプティカルフローを検出したものである。

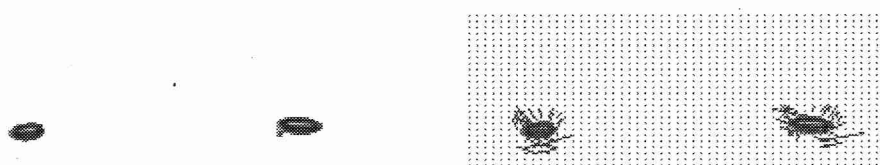




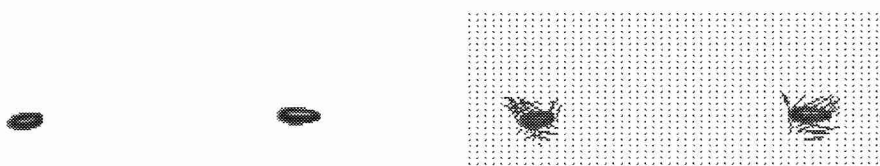
三枚目



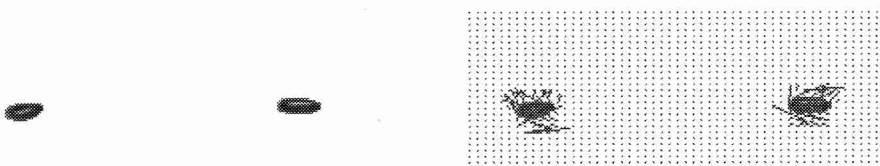
四枚目



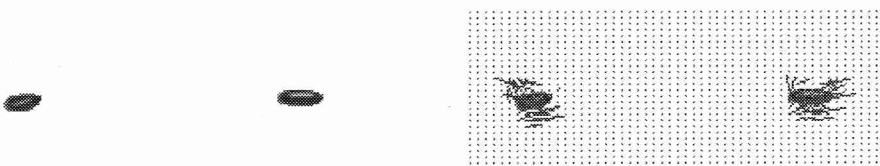
五枚目



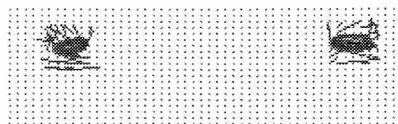
六枚目



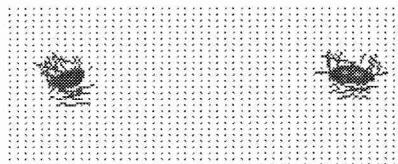
七枚目



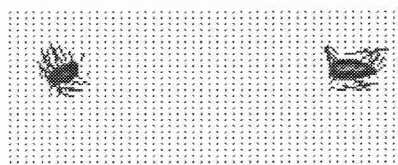
八枚目



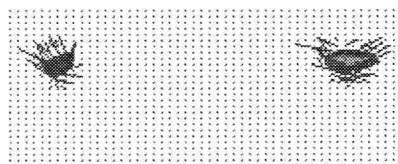
九枚目



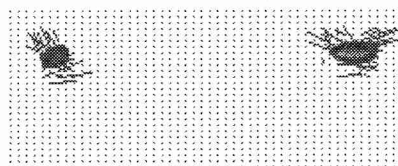
十枚目



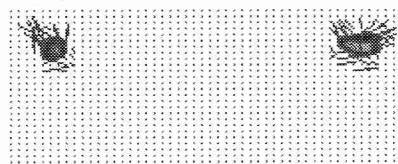
十一枚目



十二枚目



十三枚目



十四枚目



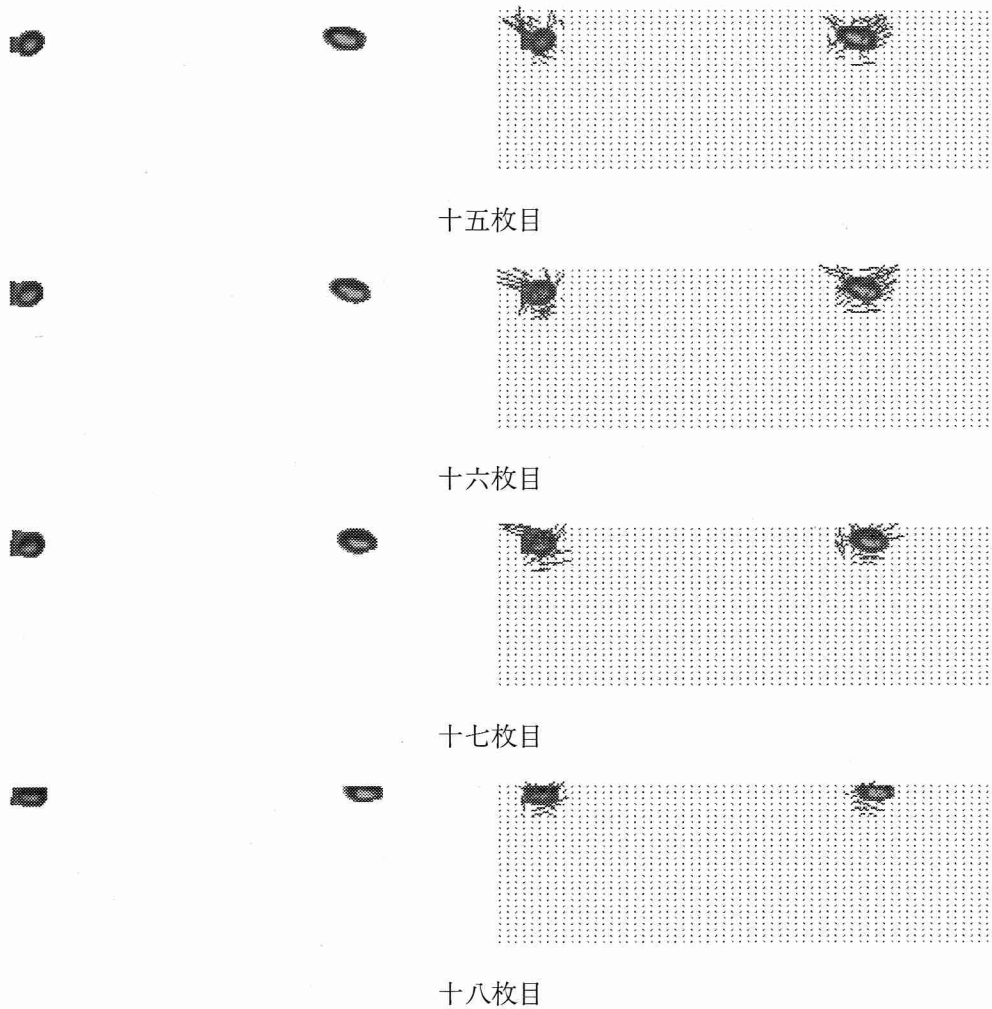


図 4.5 気泡のオプティカルフロー抽出

#### 4.4 オプティカルフローの分布結果

以上の結果を見てわかるとおり、気泡のオプティカルフローをほとんど雑音なく、抽出することができた。気泡のオプティカルフロー分布を求めた結果を示す。下図は前項の各画像から求めたものである。

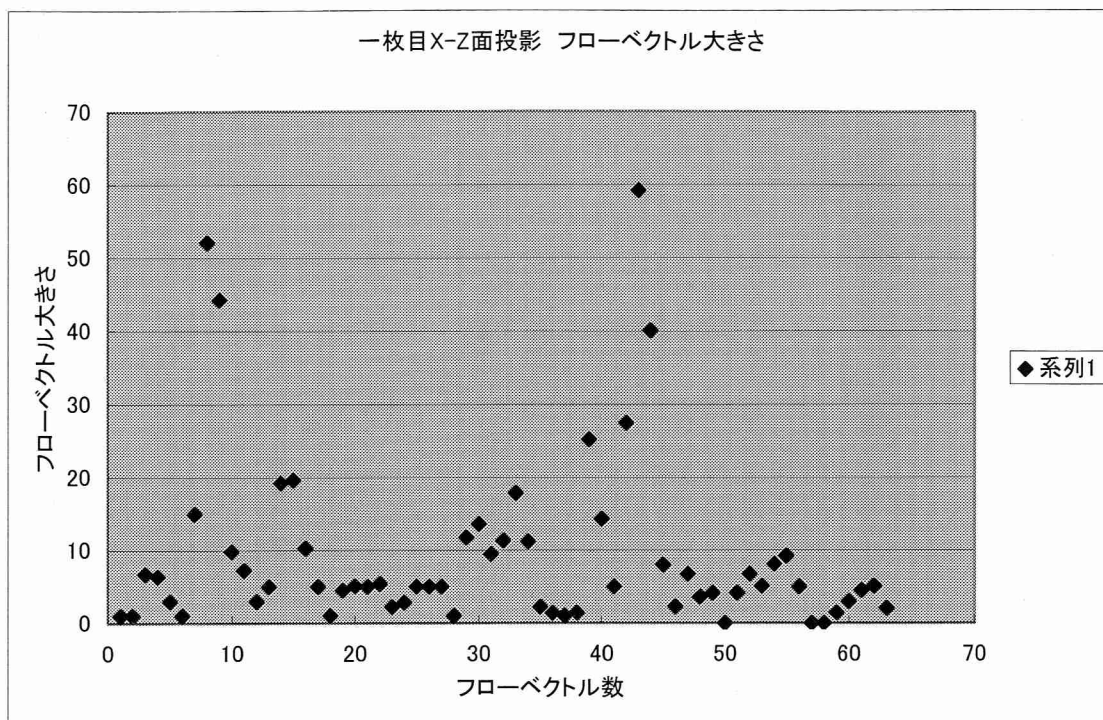


図 4.6 一枚目 X-Z 面投影フローベクトル大きさ

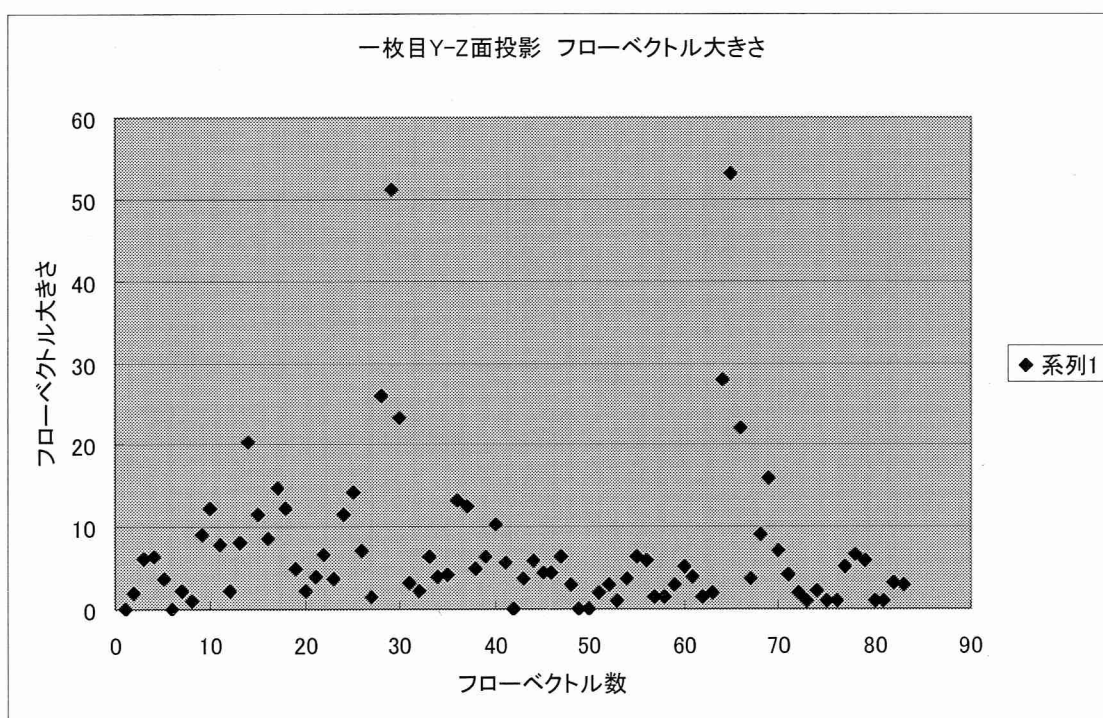


図 4.7 一枚目 Y-Z 面投影フローベクトル大きさ

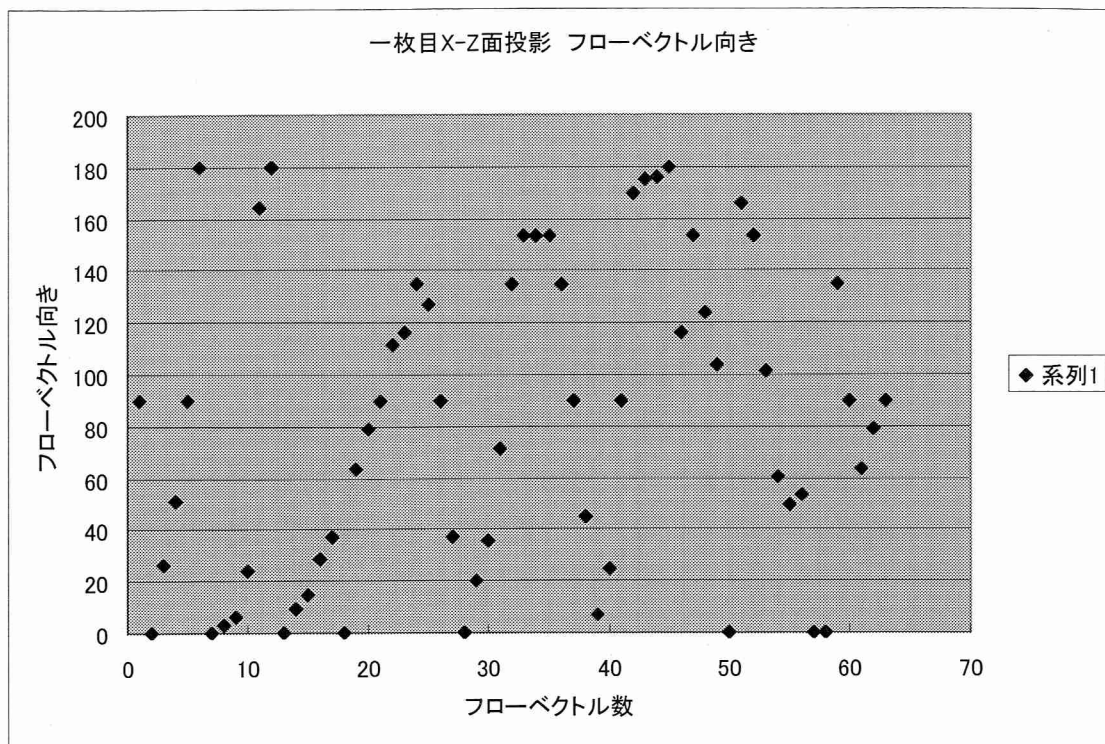


図 4.8 一枚目 X-Z 面投影フローベクトル向き

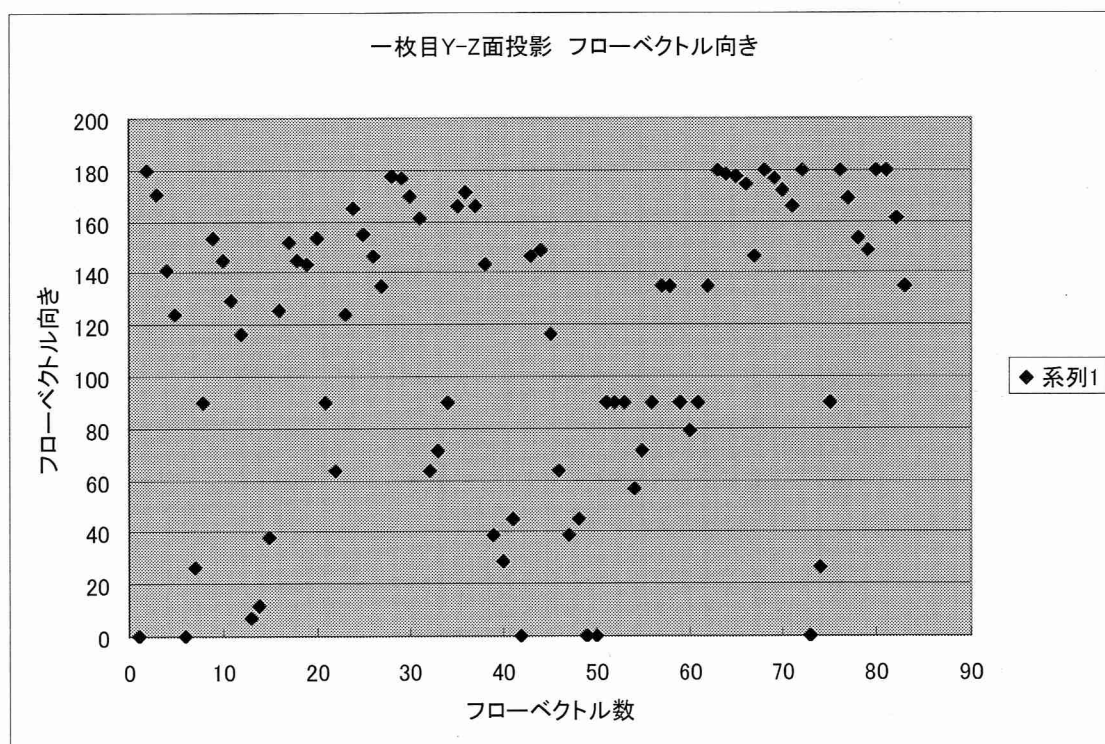


図 4.9 一枚目 Y-Z 面投影フローベクトル向き

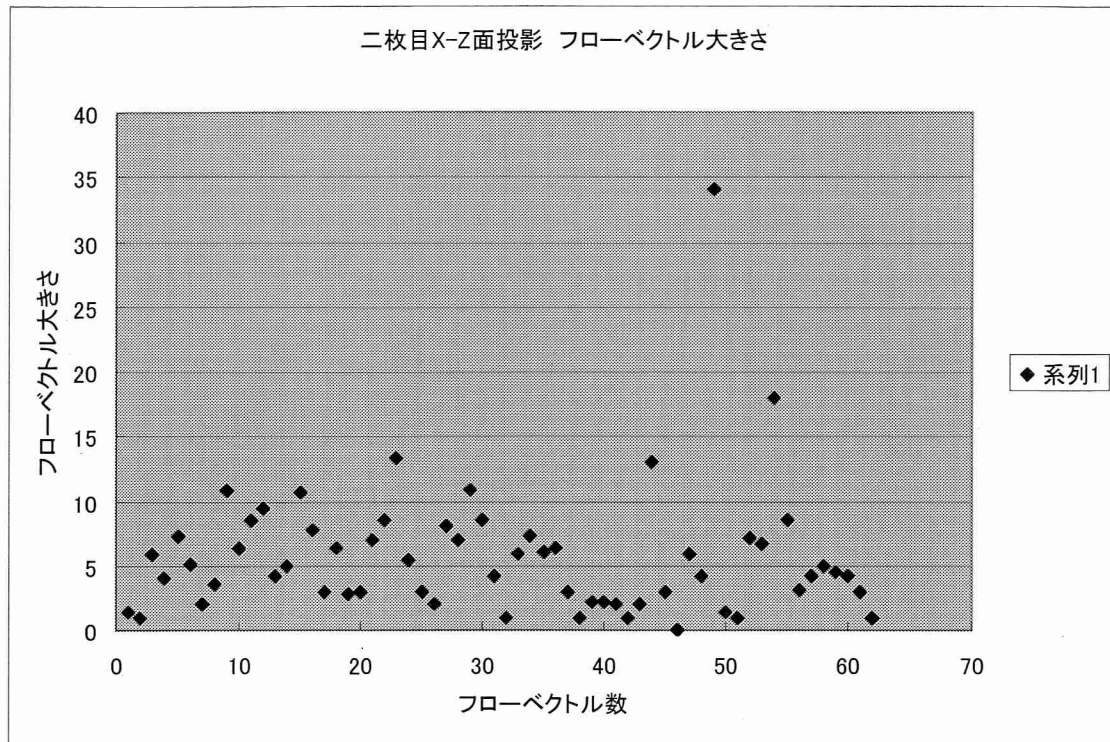


図 4.10 二枚目 X-Z 面投影フローベクトル大きさ

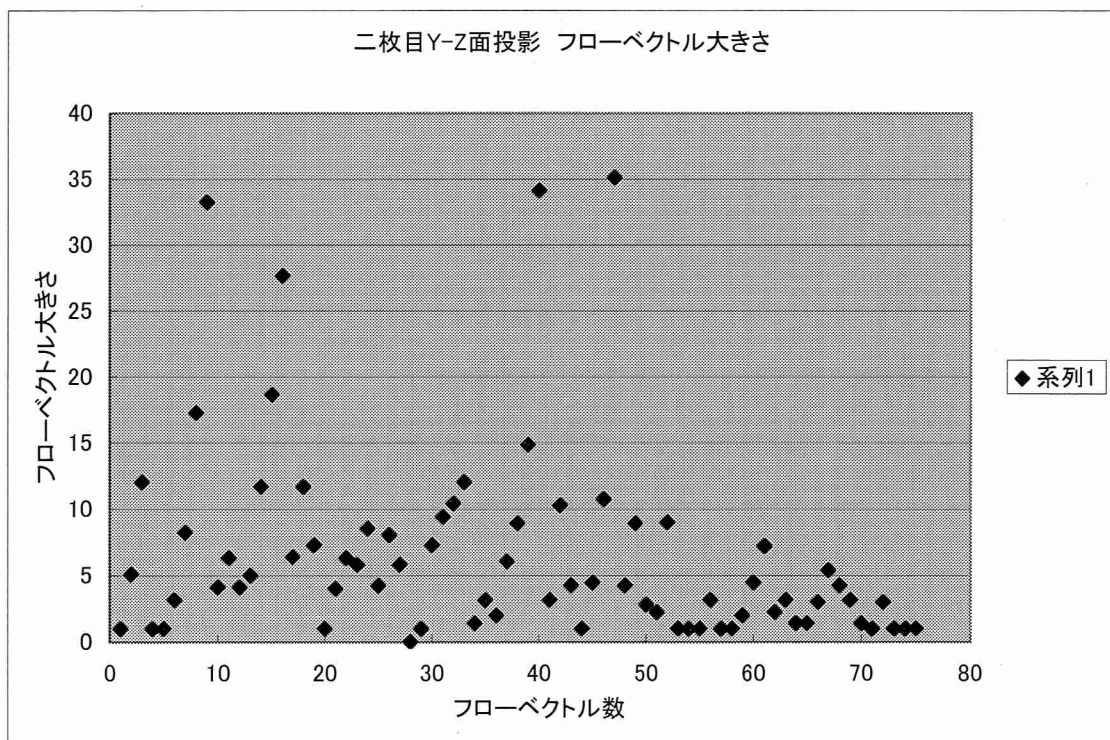


図 4.11 二枚目 Y-Z 面投影フローベクトル大きさ



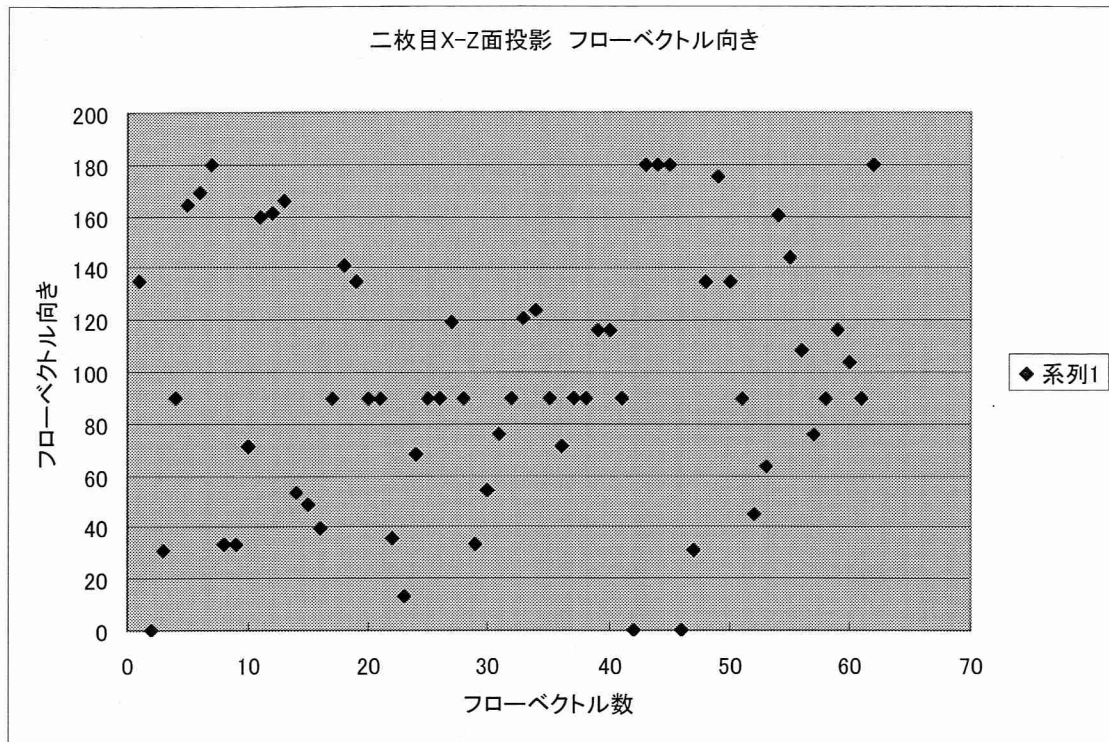


図 4.12 二枚目 X-Z 面投影フローベクトル向き

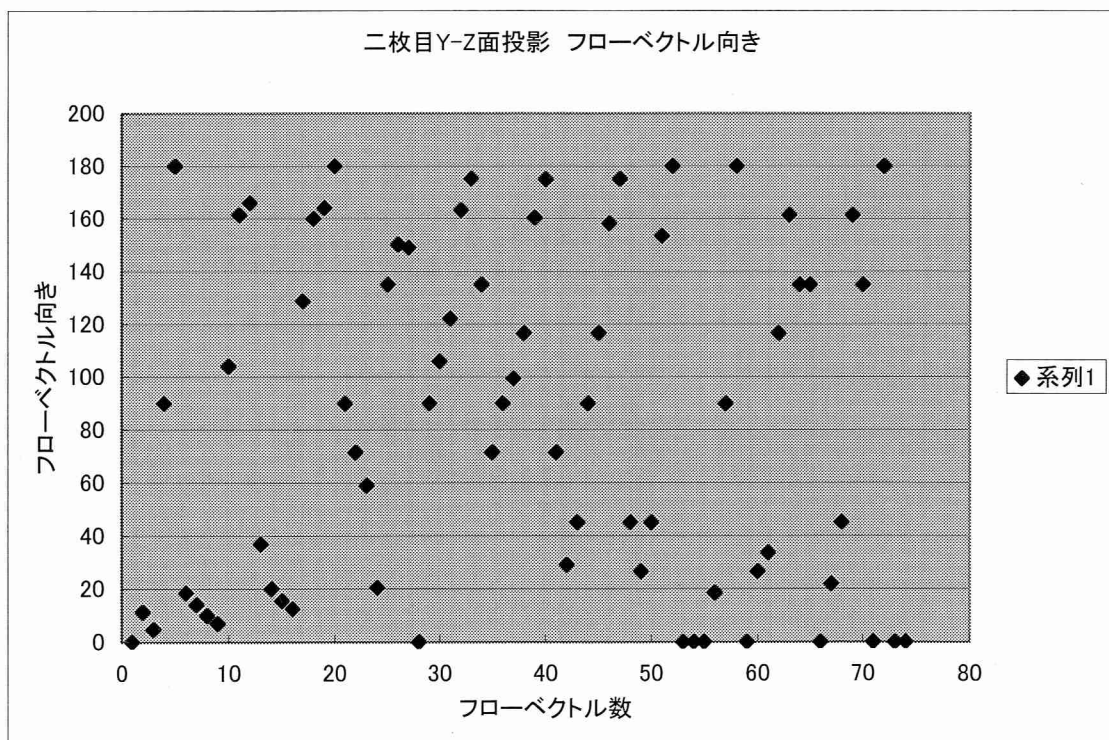


図 4.13 二枚目 Y-Z 面投影フローベクトル向き

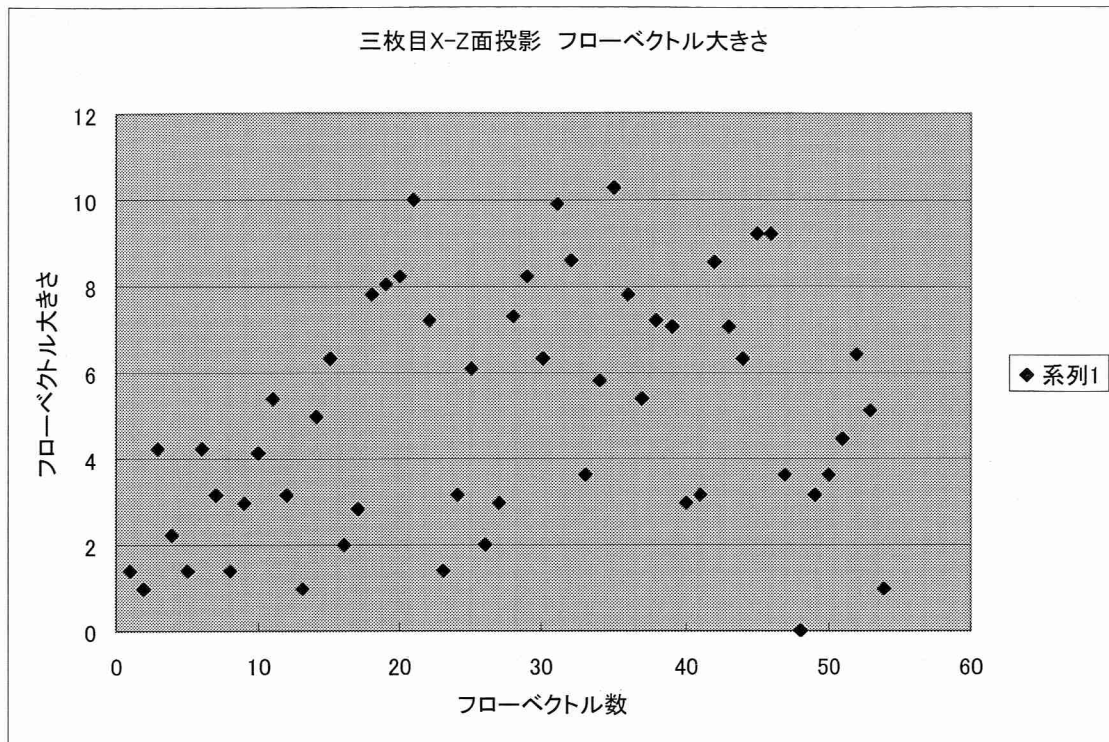


図 4.14 三枚目 X-Z 面投影フローベクトル大きさ

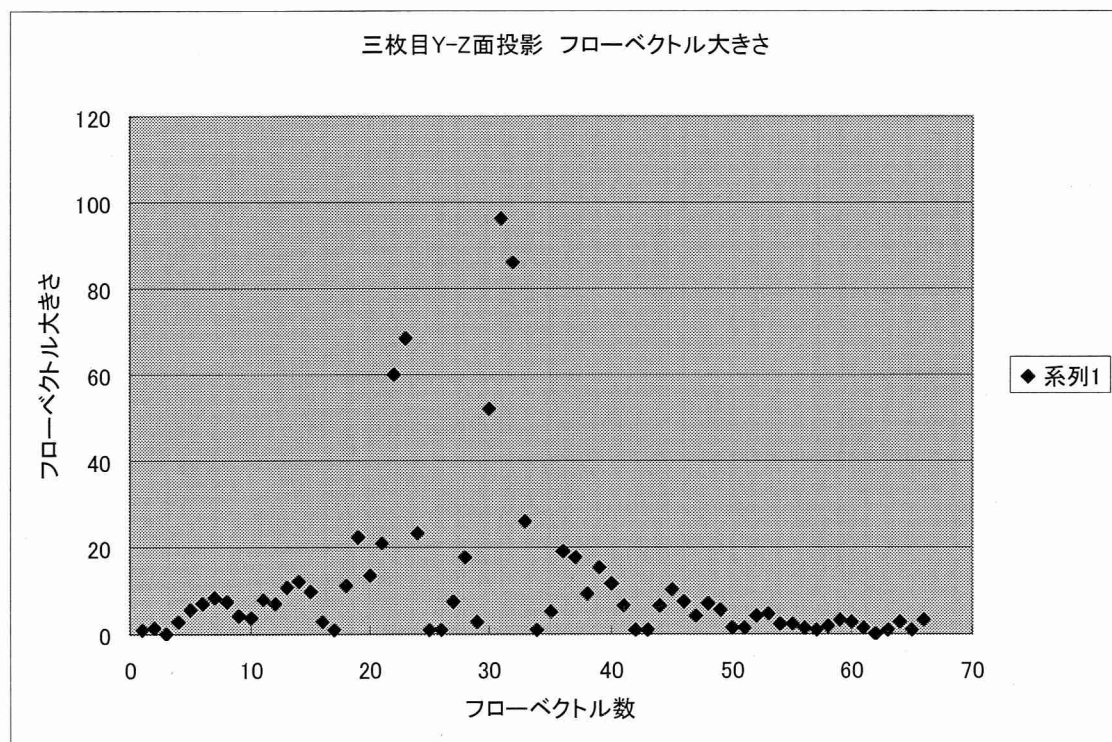


図 4.15 三枚目 Y-Z 面投影フローベクトル大きさ

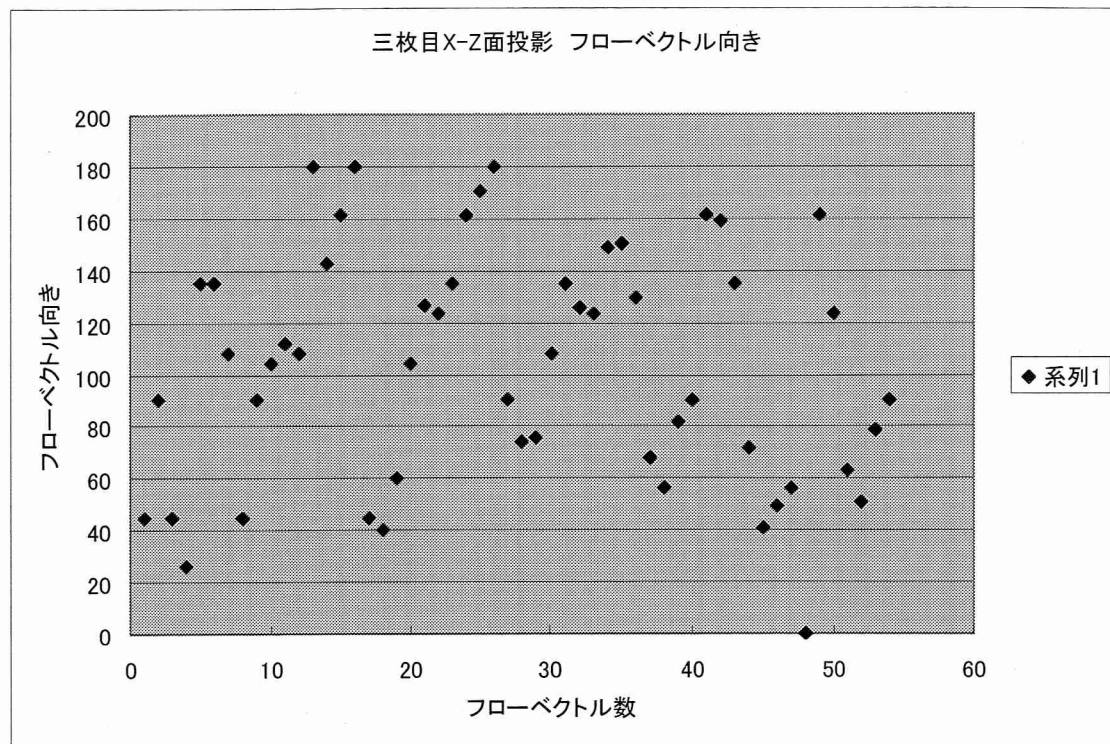


図 4.16 三枚目 X-Z 面投影フローベクトル向き

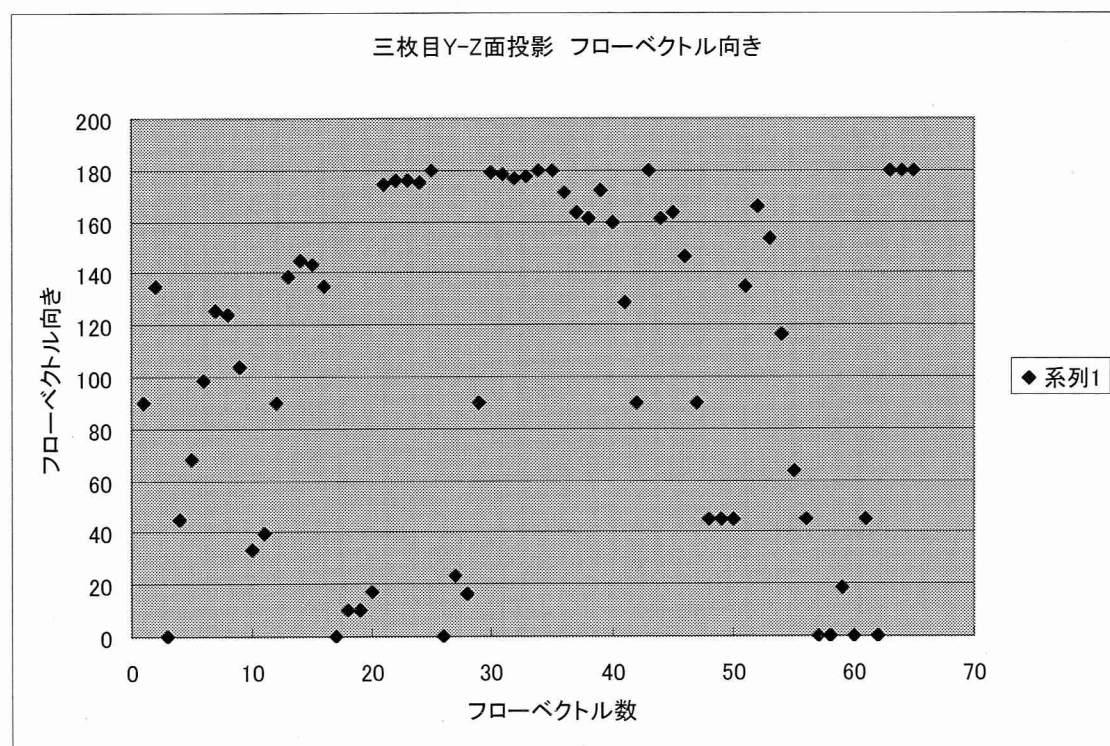


図 4.17 三枚目 Y-Z 面投影フローベクトル向き

## 4.5 オプティカルフローの分析

オプティカルフローは、局所速度情報であり誤差が多いため一点のフローベクトルからだけでは気泡の運動を決定するには信頼性が低い、気泡界面上各点の「フローベクトルは全体として一貫した運動を示すものである」という考えに基づき、各点からの局所速度情報を大局的な気泡の速度情報として取り扱う方法として、平均値により運動パラメータを決定する。平均値を行うのは、気泡表面内のある部分点を気泡の動きを示す代表点とするのではなく、全ての点において最も最適な運動を推定するということである。

フローの大きさの平均値とフローの向きの平均値は表5と示す。

X-Z 大きさ平均値	Y-Z 大きさ平均値	X-Z 向き平均値	Y-Z 向き平均値
9.26	7.24	81.08	115.45
5.71	6.54	97.37	85.54
5.01	11.63	102.91	108.60
9.43	14.34	73.73	94.82
6.29	10.41	109.77	68.45
7.71	10.79	93.69	77.25
9.89	14.09	110.97	52.94
7.57	12.77	119.06	63.87
8.09	14.33	116.55	83.00
5.78	10.06	119.66	81.08
6.55	9.08	123.68	93.02
8.33	13.38	94.24	64.54
7.28	6.79	94.53	55.83
7.60	6.72	110.41	42.95
9.98	6.64	81.70	61.30
8.87	4.92	91.49	67.77
6.16	3.96	75.31	67.42

表 5 フローの大きさの平均値とフローの向きの平均値



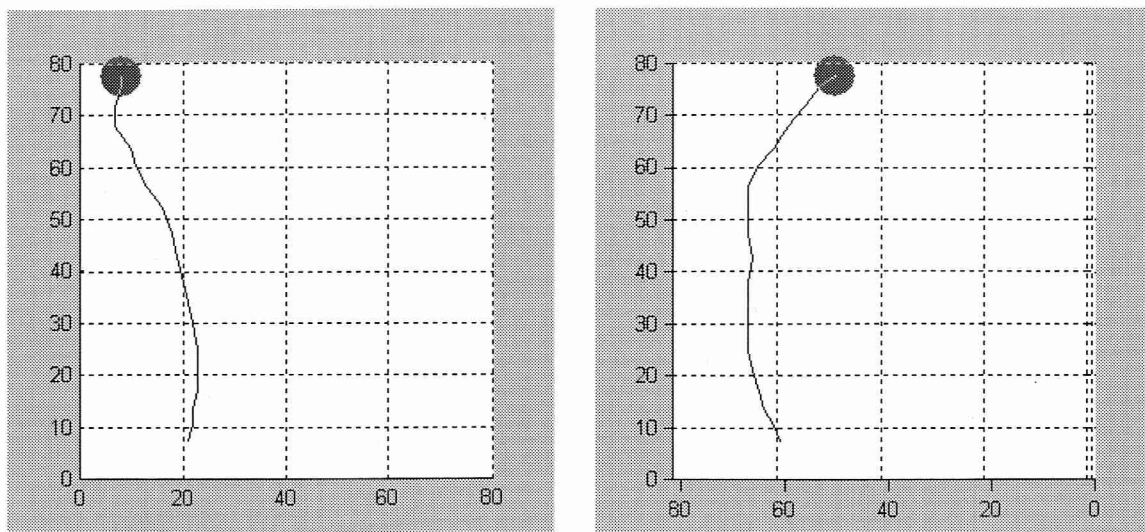


図 4. 18 気泡重心の運動軌跡

表 5 の結果と図 4.18 を比べて見ると、抽出された気泡表面の運動ベクトルの大きさと向きの平均値は、気泡重心の運動ベクトルと同じ傾向で変化して、あるいは、気泡重心の運動は気泡表面の運動ベクトルの総合で説明がつくことが分かった。

## 第5章 解析結果と検討

### 5.1 結果

ラベリング、動態マッチングを合わせ、繰り返し適用する気泡の同定は高効率、精確な方法である。この方法により検出した情報を用いて気泡の解析に重要な物理量を計算し、気泡三次元の運動ベクトルを解析することができる。またオプティカルフロー法により乱流の中にある気泡の表面状況変化を把握し、表面状況変化は、気泡の重心の変化とほぼ同じ傾向で変化していることが判明した。

### 5.2 検討

1. ステレオ撮影法で取った画像は垂直方向に補正する必要がある。
2. 水平方向の気泡の自動的な同定が必要である。
3. 二値化や雑音によって切れた気泡の部分の補填が必要である。

## 第6章 終わりに

### 6.1 結論

- I. 気泡の3次元運動ベクトル計測が可能であることを示した。
- II. ボイド率等気液二相流運動の解析に必要なパラメーターの算出が可能である。
- III. 3次元運動モデルの構築により上昇している気泡が乱れとの干渉による運動ベクトルの抽出が可能となった。
- IV. オプティカルフロー法により乱流の中にある気泡の表面状況変化を把握することができる。

### 6.2 今後の課題

- I. 長時間にわたる複数気泡の同時追跡。図 6.1。
- II. 合体や衝突する2つの気泡の同時追跡。図 6.1
- III. オプティカルフロー勾配法による気液二相流の表面形状変化の把握。図 6.2
- IV. 濡れ性の異なる垂直管に気液二相流を流し、管壁面の濡れ性が流動様式に与える影響について評価する。図 6.2、図 6.3

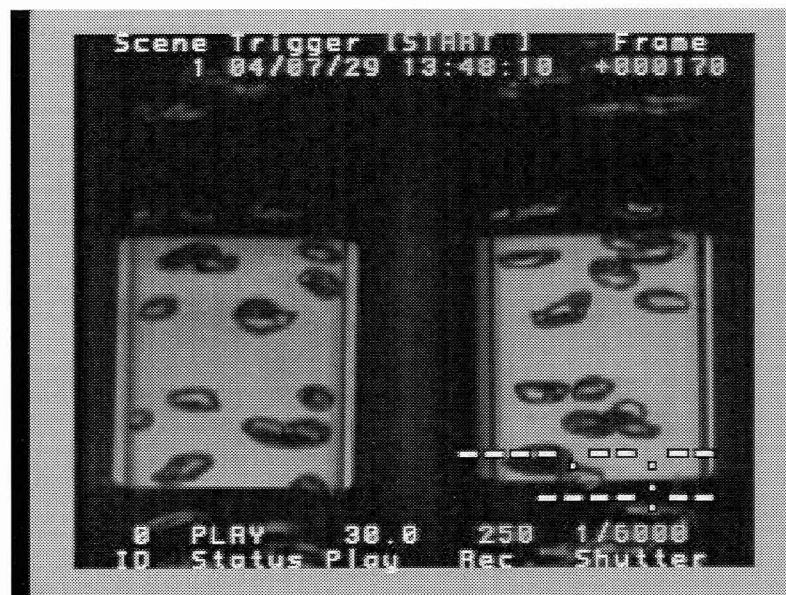


図 6.1 複数気泡図



図 6.2 ドラゴン流れ

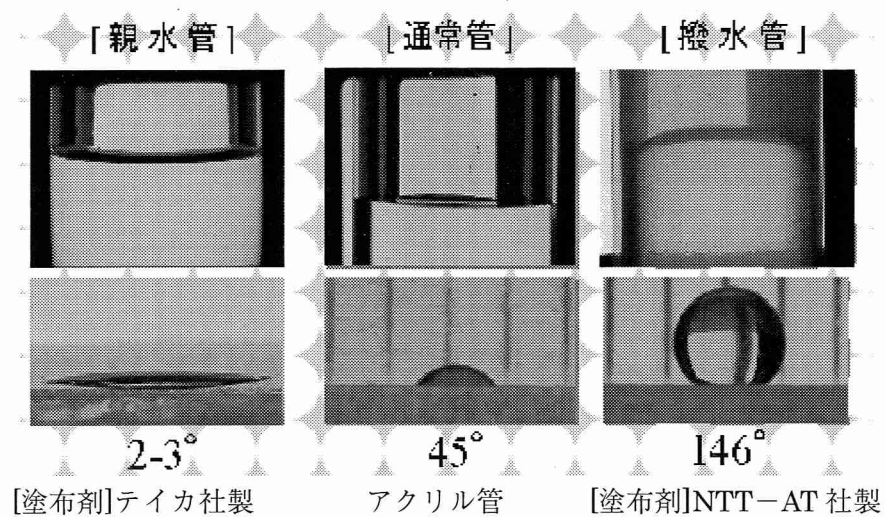


図 6.3 細管の濡れ性

## 謝辞

東京海洋大学（元東京商船大学）交通電子制御工学科修士課程において大島（正）研究室に所属して以来，大島正毅教授には終始懇切丁寧なるご指導，御鞭撻を賜りました．また，本論文をまとめるにあたり，主査として数々の貴重な御教示を頂きました．ここに深く御礼申し上げます．

東京海洋大学海洋電子機械工学科 賞雅寛而教授，東京海洋大学交通電子制御工学科 伊藤雅則教授には本研究の副査としてご指導賜りました．また，実験に関して貴重な御助言を頂き，大変参考になりました．ここに深く感謝の意を表します．

東京海洋大学交通電子制御工学科卒業生李戈峰氏、博士課程海洋情報システム工学専攻の新保雅俊氏、並びに平澤雅人氏には本研究実験において，Cなどを通してプログラミング知識を懇切丁寧に御指導頂きました．本研究においてオブティカルフローを検出するソフトウェアの作成に際して，非常に生かされたと思います．ここに感謝致します．

本研究および研究室活動をしていく上で，様々な面でご支援して下さいった東京海洋大学交通電子制御工学科大島（正）研究室龍偉助手、本多健二技官、D3年の陸躍峰氏、Yessy氏、M2年の張嘉峰氏，4年の中嶋鮎子氏に深く感謝致します．

本論文のデータを提供するおよび資料を作成するに際し，多々の意見を下さった東京海洋大学海洋電子機械工学科賞雅研究室の卒業生深町典博氏、M2年の田村尚久氏に感謝致します．また賞雅研の諸氏にも感謝致します．

最後に，本論文をまとめるにあたり常に暖かく励ましてくれた家族に心より感謝します．

## 参考文献

- [1]大島正毅, <http://carrot.isl.e.kaiyodai.ac.jp>
- [2] 賞雅寛而, 三好直巳, 画像処理による上昇気泡流の管内気泡径分布測定, 機論, 59-564, B(1993), 8.
- [3] 賞雅寛而, 近藤宏一, 画像処理法による 180° ベント管気泡流の界面形状の測定, 機論, 61-587, B(1995), 7.
- [4] 李嘉峰, 画像処理による垂直細管内の気泡計測, 東京商船大学大学院修士論文, 2002.
- [5] 賞雅寛而, 後藤建博, 木村文彦, 日引俊, 日本混相流学会年会講演論文, (2001), 199.
- [6] 賞雅寛而, 近藤宏一, ほか 3 名, 機論, 63-606, B(1997), 2.
- [7] 賞雅. ほか 3 名, 混相流シンポ講論集, 9(1990), 21.
- [8] 尾上守夫, 前田紀彦, 斉藤優, 残差逐次検定法による画像の重ね合わせ, 情報処理, vol.17, no. 7, pp. 634-640, 1976
- [9] 藤富知行, 大西昇, 杉江昇, 可変形状物体の姿勢推定についての検討, 通学技法, pp. 17-24, 1994.
- [10] Barron, Fleet, Beauchemin, Performance of Optical Flow Techniques, PhD Dissertation, Dept. of Computer Science, Carnegie-Mellon Univ. , 1984.
- [11] 嶋中徹, オプティカルフローの正確な推定に関する研究, 北陸先端科学技術大学院大学修士論文, 1996.
- [12] 岡田 隆三, 白井 良明, 三浦 純, 久野 義徳, “オプティカルフローと距離情報に基づく動物体追跡”, 電子情報通信学会論文誌 D- II Vol. j80-D- II No.6 pp.1530-1538, 1997 年 6 月
- [13] 大島 正毅, 白井 良明, “3 次元情報を用いた物体認識”, 電子情報通信学会論文誌 別刷 Vol. j65-D No.5 pp.1086-1095, 1982 年 5 月
- [14] Haibo Li, Pertti Roivainen, Robert Forchheimer, 3-D Motion Estimation in Model-Based Facial Image Coding, IEEE T-PAMI, pp. 545-555, 1993.
- [15] 岡田 隆三, 白井 良明, 三浦 純, 久野 義徳, “オプティカルフローと距離情報の統合による 3 次元運動する人間の追跡”, 電子情報通信学会論文誌 D- II Vol. j82-D- II No.8 pp.1252-1261, 1999 年 8 月
- [16] 浅田稔, ダイナミックシーンの理解, 東京, 電子情報通信学会, 1994.
- [17] 角 保志, 富田 文明, “ステレオビジョンによる 3 次元物体の認識”, 電子情報通信学会論文誌 D- II Vol. j80-D- II No.5 pp.1105-1112, 1997 年 5 月
- [18] 依田 育士, 坂上 勝彦, “3 次元動き情報を利用した複数対象物の抽出とその実時間認識”, 電子情報通信学会論文誌 D- II Vol. j81-D- II No.9 pp.2043-2051, 1998 年 9 月
- [19] 小野口 一則, 武田 信之, 渡辺 睦 “ステレオ画像の平面投影による移動障害物位置検出”,

電子情報通信学会論文誌 D-II Vol. j81-D-II No. 8 pp.1895-1903, 1998 年 8 月

[20]渡辺 斉, 和田 俊和, 松山 隆司 “照明変化に対して頑健な背景差分法”, コンピュータビジョンとイメージメディア 115-3 pp.17-24, 1999, 3, 18

[21]鈴木 充雄, 大島 正毅 “船上からの時系列画像を用いた航行船舶の検出実験”, 日本航海学会第 99 回講演会, 1998 年 11 月

[22]池田 徹, 大中 慎一, 溝口 正典 “画像の一様変化に高速追従する背景画像生成手法”, 信学技報 PRMU97-7 pp.49-56, 1997 年 5 月

[23]臼井, 芝蒲工大研究報告理工系, 29-2(1985), 11.

[24]長井 敦, 白井 良明, 久野 義徳, “複雑変動背景下における移動物体の検出”, 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol. j80-D-II No. 5 pp.1086-1095, 1997 年 5 月

[25]星野 准一, 増田 功, “局所的な輝度変動にロバストなパノラマ画像生成法”, 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol. j82-D-II No. 2 pp.222-229, 1999 年 2 月

[26]河井 良浩, 植芝 俊夫, 吉見 隆, 大島 正毅 “多視点レンジデータからの 3 次元形状復元”, 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol. j75-D-II No. 4 pp.737-748, 1992 年 4 月

[27]大崎 喜彦, 山本 正信, “ステレオ画像からの 3 次元近似モデルのモデルフィッティング”, 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol. j81-D-II No. 6 pp.1259-1268, 1998 年 6 月

[28]安藤栄治, 阿部亨, “動画像の領域分割に基づく人体の姿勢推定と追跡に関する研究”, 北陸先端科学技術大学院大学, 1997 年 2 月

[29] 加藤 尚徳, 尺長 健, “スティックモデルを用いたステレオ画像からの人物姿勢の連続的推定”, 信学技報 D-II PRMU98-255 No. 3 pp.81-88, 1999 年 3 月

[30]田村秀行, コンピュータ画像処理, 東京, オーム社, 2002 年 11 月

[31]橋本 基, 百田 正広, 野村 厚志, パソコンによる動画画像処理, 森北出版株式会社, 1993

[32] Jean-Marie Le Corre \*, Mamoru Ishii, Numerical evaluation and correction method for multi-sensor probe measurement techniques in two-phase bubbly flow, Nuclear Engineering and Design 216 (2002) 221-238

[33] Kataoka, I., Ishii, M., Serizawa, A., 1994. Sensitivity analysis of bubble size and probe geometry on the measurements of interfacial area concentration in gas-liquid two-phase flow. Nucl. Eng. Design 146, 53-70.

[34]Shom S. Ponoth, J. B. McLaughlin Numerical simulation of mass transfer for bubbles in water Chemical Engineering Science 55 (2000) 1237-1255

[35]Chao, B. T. (1962). Motion of spherical gas bubbles in a viscous liquid at large Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 5, 69-79.

[36]Clarke, D. S. (1962). *Mass transfer from bubbles to glycerol solutions*. Ph.D. dissertation, University of Birmingham. Crank, J. (1957). *The mathematics of diffusion*.

Oxford, UK: Oxford University Press.

[37]Cuenot, B., Magnaudet, J., & Spennato, B. (1997). The effects of slightly soluble surfactants on the flow around a spherical bubble. *Journal of Fluid Mechanics*, 339, 25|53.

[38]Cussler, E. L. (1997). *Diffusion*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. Duineveld, P. C. (1994). *Bouncing and coalescence of two bubbles in water*. Ph.D. dissertation, University of Twente.

[39]Douglas, J., Furtado, F., & Pereira, F. (1997). On the numerical simulation of waterflooding of heterogeneous petroleum reservoirs. *Computers and Geosciences*, 1, 155|190.

[40]Gray, D. E. (1972). *American institute of physics handbook* (3rd ed). Newyork: McGraw-Hill.

[41]Haberman, W. L., & Morton, R. K. (1954). An experimental study of bubbles moving in liquids. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 387, 227|252.

[42]Hadamard, J. S. (1911). Mouvement permanent lent d'une sphere liquide visqueuse dans un liquid visqueux. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 152, 1735|1738.